



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

NATÁLIA MILHOMEM BARBOSA GONÇALVES

**ADSORÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS DE EFLUENTE SINTÉTICO EM COLUNA DE
FILTRAÇÃO UTILIZANDO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**PALMAS - TO
2020**

NATÁLIA MILHOMEM BARBOSA GONÇALVES

**ADSORÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS DE EFLUENTE SINTÉTICO EM COLUNA DE
FILTRAÇÃO UTILIZANDO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS - TO

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

G635a Gonçalves, Natália Milhomem Barbosa
 ADSORÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS DE EFLUENTE SINTÉTICO
 EM COLUNA DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO BAGAÇO DA CANA-
 DE-AÇÚCAR / Natália Milhomem Barbosa Gonçalves. – Palmas, TO,
 2020.
 78 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2020.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Adsorção de óleos e graxas. 2. Bagaço da cana-de-açúcar. 3.
Coluna de filtração. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

FOLHA DE APROVAÇÃO

NATÁLIA MILHOMEM BARBOSA GONÇALVES

ADSORÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS DE EFLUENTE SINTÉTICO EM COLUNA DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

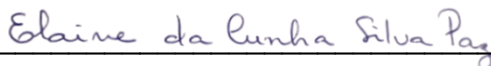
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas, como exigência à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 27/08/2020.

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador - IFTO



Profa. Me. Elaine da Cunha Silva Paz
Examinadora Interna - IFTO



Profa. Me. Michelle Ludmila Guedes dos Santos
Examinadora Interna – IFTO

Dedico

A minha mãe, por todo o amor em mim depositado e por me apoiar incondicionalmente.

À memória de meu eterno melhor amigo Pedro Paulo, que sonhava tornar-se Engenheiro Civil.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proteger e me ensinar como ser uma pessoa de bem.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, pela disposição em me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigada, professor, pelos ensinamentos, colaboração, dedicação, conselhos e todo o suporte durante a pesquisa. Parabéns pela pessoa bondosa e atenciosa que você é. Você é sem igual.

À minha mãe, por todo carinho e amor a mim dedicados.

À tia Violeta, pelo apoio desde o início dessa caminhada acadêmica.

À minha avó, pela torcida e sabedoria compartilhada.

Aos tios Armando e Alberto pela assistência fundamental para a conclusão do curso.

À Keila, pela grande contribuição em minha criação e por manter-se presente em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Rachel e Lucas, que apesar da distância geográfica, estão sempre presentes.

Ao meu sobrinho Bernardo, que trouxe tanta alegria e mais união à minha família.

Ao meu namorado Felipe, que foi o melhor presente da faculdade. Obrigada pelo apoio nas horas difíceis, e por todo o amor e companheirismo.

A todos os familiares, pelos momentos de alegria que compartilhamos quando estamos juntos.

RESUMO

GONÇALVES, Natália Milhomem Barbosa. **Adsorção de óleos e graxas de efluente sintético em coluna de filtração utilizando bagaço da cana-de-açúcar**. 2020. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

Efluentes com concentração de óleos e graxas são constantemente produzidos e provocam sérios problemas aos corpos d'água receptores, quando não atendem aos padrões ambientais de descarte. Diante da crescente preocupação com o meio ambiente, a busca por tratamentos eficientes e de baixo custo para a remoção de componentes oleosos presentes em efluentes têm se intensificado. Nesse sentido, a adsorção apresenta-se como um processo útil para o tratamento de águas residuais, de forma a reduzir ou remover substâncias indesejadas presentes em efluentes gerados em vários setores. Para a redução e remoção, de maneira simples, barata e eficiente, a utilização de resíduos da agroindústria como adsorvente apresenta-se como uma alternativa. Uma vez que o Brasil é o maior produtor mundial da cana-de-açúcar, o resíduo proveniente da moagem da planta (bagaço) é consequentemente gerado em grandes quantidades e muitas vezes não possui destinação final ambientalmente adequada, destacando-se como uma opção de adsorvente. Dessa forma, este trabalho objetivou utilizar o bagaço da cana-de-açúcar em coluna de filtração como adsorvente de óleos e graxas presentes em efluente produzido sinteticamente. O bagaço da cana *in natura* coletado e preparado, foi caracterizado em ensaios de cinética de perda de massa, análise granulométrica, densidade aparente, análise imediata e ensaio de adsorção de azul de metileno para duas concentrações do corante (2 mg/L e 10 mg/L). O efluente foi simulado com concentração de 167,5 mg de óleo lubrificante para motor/L de água de abastecimento, e foi caracterizado no decorrer do processo de adsorção e em seu estado bruto, analisando os parâmetros: temperatura, pH, sólidos totais, turbidez, alcalinidade e óleos e graxas. Para o ensaio de adsorção em coluna de filtração utilizou-se reservatório de 50L contendo um agitador mecânico instalado como equipamento auxiliar para a mistura constante do efluente sintético. A concentração de óleos e graxas foi avaliada através da metodologia que utiliza clorofórmio como solvente para extração do óleo emulsionado presente no efluente, e analisada em espectrofotômetro DR 6000 através da leitura de absorbância. Os resultados obtidos na caracterização do bagaço foram: 0,057 g/mL de densidade aparente, 8,48% de teor de umidade, 84,21% de teor de materiais voláteis, 1,53% de teor de cinzas, 5,77% de teor de carbono fixo, e remoção quase total das concentrações de corante durante aproximadamente 5h de ensaio. O processo de adsorção de óleos e graxas resultou em 100% de eficiência de remoção ao longo de aproximadamente 95h, tratando quase 38 L de efluente. A capacidade de adsorção obtida foi de 3447,17 mg/g. O ensaio mostrou grande potencial do bagaço da cana-de-açúcar como adsorvente para remoção de óleos e graxas presentes em um efluente, indicando-o como uma alternativa sustentável para resolução da problemática ambiental de descarte de efluentes com altas concentrações de óleos e graxas em corpos d'água.

Palavras-chave: Efluentes. Óleos e graxas. Remoção. Adsorção. Bagaço da Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

GONÇALVES, Natália Milhomem Barbosa. **Adsorption of oils and greases from synthetic effluents in the filtration column using sugarcane bagasse.** 2020. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2020.

Effluents with a concentration of oils and greases are constantly produced and cause serious problems for the receiving water bodies, when they do not meet the environmental standards for disposal. In view of the growing concern with the environment, the search for efficient and low-cost treatments for the removal of oily components present in effluents has intensified. In this sense, adsorption presents itself as a useful process for the treatment of wastewater, in order to reduce or remove unwanted substances present in effluents generated in various sectors. For the reduction and removal, in a simple, inexpensive and efficient way, the use of agro-industrial residues as an adsorbent presents itself as an alternative. Since Brazil is the world's largest producer of sugarcane, the residue from the milling of the plant (bagasse) is consequently generated in large quantities and often does not have an environmentally appropriate final destination, standing out as an option for adsorbent. Thus, this work aimed to use sugarcane bagasse in a filtration column as an adsorbent for oils and greases present in synthetically produced effluent. The collected and prepared sugarcane bagasse was characterized in mass loss kinetics tests, granulometric analysis, apparent density, immediate analysis and methylene blue adsorption test for two dye concentrations (2 mg/L and 10 mg/L). The effluent was simulated with a concentration of 167,55 mg of engine lubricating oil/L of supply water, and was characterized during the adsorption process and in its raw state, analyzing the parameters: temperature, pH, total solids, turbidity, alkalinity and oils and greases. For the adsorption test in the filtration column, a 50L reservoir was used containing a mechanical stirrer installed as an auxiliary equipment for the constant mixing of the synthetic effluent. The concentration of oils and greases was evaluated using the methodology that uses chloroform as a solvent to extract the emulsified oil present in the effluent, and analyzed in a DR 6000 spectrophotometer through the absorbance reading. The results obtained in the characterization of the bagasse were: 0,057 g/mL of apparent density, 8,48% of moisture content, 84,21% of volatile material content, 1,53% of ash content, 5,77% of fixed carbon content, and almost total removal of dye concentrations during approximately 5 hours of testing. The oil and grease adsorption process resulted in 100% removal efficiency over approximately 95h, treating almost 38 L of effluent. The obtained adsorption capacity was 3447,17 mg/g. The test showed great potential for sugarcane bagasse as an adsorbent for the removal of oils and greases present in an effluent, indicating it as a sustainable alternative for solving the environmental problem of discharging effluents with high concentrations of oils and greases in bodies of water.

Keywords: Effluents. Oils and greases. Removal. Adsorption. Sugarcane bagasse.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de óleos e graxas determinados em diferentes efluentes	17
Tabela 2 - Estados que possuem legislação sobre lançamento de efluentes.....	18
Tabela 3 - Produção de cana nos anos de 2018 e 2019 na região norte	27
Tabela 4 - Métodos analíticos para caracterização do efluente	46
Tabela 5 - Parâmetros físicos do sistema de coluna de filtração com bagaço da cana-de-açúcar	52
Tabela 6 - Resultado da análise granulométrica realizada para o bagaço da cana-de-açúcar triturado	58
Tabela 7 - Resultado da análise de densidade aparente do bagaço da cana	60
Tabela 8 - Resultados da análise imediata	61
Tabela 9 - Resultados da caracterização do efluente	65
Tabela 10 - Síntese dos resultados de adsorção em coluna de filtração	67

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Óleo livre e emulsionado	16
Figura 2 - Representação esquemática da formação de camadas no processo de adsorção por quimissorção e/ou fisissorção.....	22
Figura 3 - Estrutura da cana-de-açúcar	25
Figura 4 - Ciclo produtivo de açúcar e etanol	25
Figura 5 - Produção Mundial de cana-de-açúcar em 2009 (mil toneladas)	26
Figura 6 - Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil	27
Figura 7 - Bagaço da cana-de-açúcar	28
Figura 8 - Curva de ruptura para adsorção em coluna de filtração.....	30
Figura 9 – Desenho esquemático das atividades desenvolvidas	33
Figura 10 - Limpeza do bagaço da cana-de-açúcar	34
Figura 11 - Secagem do bagaço da cana-de-açúcar.....	35
Figura 12 - Biomassa utilizada no ensaio	36
Figura 13 - Peneiras padronizadas.....	37
Figura 14 - Proveta de 100 mL vazia e com o bagaço triturado e peneirado	38
Figura 15 - Cadinhos com amostra submetidos ao aquecimento.....	40
Figura 16 - Amostra após o aquecimento.....	41
Figura 17 - Amostra após ensaio de teor de cinzas	42
Figura 18 - Sistema de filtração de azul de metileno em bagaço da cana-de-açúcar	43
Figura 19 - Padrões utilizados para confecção da curva de calibração.....	44
Figura 20 - Curva de calibração para teste de adsorção de azul de metileno	44
Figura 21 – Óleo lubrificante utilizado para preparação do efluente sintético	45
Figura 22 – Condutivímetro para análise da temperatura	47
Figura 23 - Medidor de pH.....	47
Figura 24 - Banho maria utilizado para ensaio de sólidos totais.....	48
Figura 25 - Turbidímetro	48
Figura 26 - Agitador magnético utilizado para análise de alcalinidade	49
Figura 27 - Espectrofotômetro para análise de óleos e graxas	49
Figura 28 - Sistema do experimento de adsorção em coluna de filtração	50
Figura 29 - Esquema do experimento de adsorção em coluna de filtração.....	51

Figura 30 - Funil de separação.....	53
Figura 31 - Curva de calibração para ensaio de adsorção de óleos e graxas	54
Figura 32 - Perda de massa em função do tempo.....	57
Figura 33 - Bagaço após análise granulométrica	59
Figura 34 - Curva de ruptura para concentração de 2 mg/L	62
Figura 35 - Curva de ruptura para concentração de 10 mg/L	63
Figura 36 - Bagaço da cana após o teste de adsorção de azul de metileno	64
Figura 37 - Curva de ruptura e de eficiência.....	67
Figura 38 - Curva de colmatação	68
Figura 39 - Principais mecanismos de transporte de um adsorvato em massa líquida para um adsorvente	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 PROBLEMA DE PESQUISA	13
3 JUSTIFICATIVA.....	13
4 OBJETIVOS.....	14
4.1 Objetivo Geral.....	14
4.2 Objetivos Específicos	14
5 REVISÃO DE LITERATURA	15
5.1 Definição e problemática dos óleos e graxas.....	15
5.2 Disposição final do efluente com óleos e graxas.....	18
5.3 Formas de tratamento de efluentes com óleos e graxas.....	20
5.4 Processo de adsorção	21
5.4.1 Tipos de adsorventes	22
5.4.1.1 Cana-de-açúcar.....	24
5.4.1.1.1 Cadeia produtiva da cana-de-açúcar.....	26
5.4.1.1.2 Propriedades e aplicações do bagaço da cana-de-açúcar.....	28
5.4.2 Tipos de ensaios de adsorção.....	29
5.4.3 Curva de ruptura	30
5.5 Adsorção de óleos e graxas com bagaço da cana-de-açúcar.....	31
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	33
6.1 Coleta do bagaço da cana-de-açúcar	33
6.2 Preparação do adsorvente	34
6.3 Caracterização do adsorvente	35
6.3.1 Cinética de perda de massa.....	35
6.3.2 Análise granulométrica.....	36
6.3.3 Determinação da densidade aparente	37

6.3.4 Análise imediata	38
6.3.4.1 Teor de umidade	39
6.3.4.2 Teor de material volátil	39
6.3.4.3 Teor de cinzas	41
6.3.4.4 Teor de carbono fixo.....	42
6.3.5 Teste de adsorção de azul de metileno.....	42
6.4 Preparação do efluente sintético	45
6.5 Caracterização do efluente.....	46
6.6 Ensaio de adsorção em coluna de filtração	50
6.6.1 Determinação da concentração de óleos e graxas	52
6.6.2 Determinação da capacidade de adsorção	55
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
7.1 Caracterização do adsorvente	56
7.1.1 Cinética de perda de massa.....	56
7.1.2 Análise granulométrica	57
7.1.3 Determinação da densidade aparente	59
7.1.4 Análise imediata	60
7.1.5 Teste de adsorção de azul de metileno.....	62
7.2 Caracterização do efluente.....	64
7.3 Ensaio de adsorção em coluna de filtração	66
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional atrelado ao desenvolvimento contínuo do setor petrolífero provocam a maior geração de águas residuais com alta presença de óleos e graxas. Nas residências isso se dá através da limpeza de utensílios domésticos sujos de óleo, ou ainda do descarte incorreto de óleo utilizado para fritura diretamente na rede de esgoto sanitário. Além disso grande parte das indústrias e as operações para a produção do petróleo também geram efluentes com alta presença de óleos e graxas.

Os efluentes residenciais com a presença de óleos e graxas apresentam problemas desde que são descartados na rede de esgoto, podendo provocar o bloqueio parcial ou total das tubulações, reduzindo a eficiência do processo de tratamento de esgoto, até prejuízos diretos ao meio ambiente, quando tais efluentes não alcançam um elevado nível de remoção desses poluentes e são descartados nos corpos hídricos com alta quantidade do contaminante.

Óleos e graxas por apresentarem pouca solubilidade, quando entram em contato com os recursos hídricos formam uma película que não se dissolve na superfície, o que afeta a iluminação e aeração da água. A alta toxicidade desse produto prejudica o ecossistema e o ser humano. E ainda, afetam a região em que são despejados com o odor e aspecto ruim, impactando no turismo e em outras atividades geradoras de renda na região contaminada (BONI, 2012).

O contato de óleos e graxas com o meio ambiente pode gerar impactos ambientais que acarretam em problemas econômicos, sociais, sanitários e ecológicos. De acordo com Brasil *et al.* (2016) 1 litro de óleo de cozinha pode contaminar até 25 mil litros de água.

Por outro lado, pesquisas para a remoção de componentes oleosos têm evoluído no decorrer dos anos, no qual destaca-se o processo de adsorção, que se caracteriza pela utilização de sólidos para reter em sua superfície partículas através de ações físicas ou químicas. Tal processo pode ser utilizado no processo de tratamento de efluentes e também em vazamentos de óleo em corpos d'água.

Os estudos envolvendo o processo de adsorção têm se encaminhado para a utilização de resíduos agrícolas, visto que a necessidade da exploração de novas utilidades para tais resíduos cresce com a mesma proporção que a sua geração. De acordo Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, ou simplesmente cana, e consequentemente grande gerador do resíduo desse produto, conhecido como bagaço da cana-de-açúcar, que muitas vezes não possui lugar específico para ser descartado. Diante disso, pesquisas sobre adsorção de óleos e graxas presentes em efluentes encaminham-se para o aproveitamento do bagaço da cana nesse processo.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

De que forma o bagaço da cana-de-açúcar se comporta quando utilizado como um adsorvente para redução e remoção da concentração de óleos e graxas presentes em efluente sintético?

3 JUSTIFICATIVA

Um dos maiores problemas relacionados à agroindústria brasileira é a grande geração de resíduos, e no caso da indústria da cana-de-açúcar esse panorama encaixa-se perfeitamente, pois o bagaço é um material altamente produzido e que na maioria das vezes não possui disposição final ambientalmente adequada. Apesar do Brasil ser o maior produtor mundial na cana-de-açúcar, o bagaço ainda é um resíduo de baixa exploração. Fazendo-se necessário o desenvolvimento de estudos e técnicas que visem dar um destino sustentável ao grande volume gerado desse resíduo (BATTISTELLE, MARCILIO & LAHR, 2008).

Uma outra problemática brasileira é o lançamento de efluentes com alta concentração de óleos e graxas em corpos d'água, o que pode provocar graves problemas ambientais, acarretando alterações nas características químicas e físicas da água. O lançamento desses efluentes deve-se obedecer a padrões e condições impostos por órgãos ambientais de forma a não acarretar tais alterações. (BONI, 2012).

Assim, o estudo sobre o comportamento do bagaço da cana-de-açúcar como adsorvente com o objetivo de promover a redução e remoção da concentração de óleos e graxas de efluentes, mostra-se como uma alternativa de aproveitamento de um resíduo altamente produzido no Brasil, de forma a transformá-lo em um material de alto valor agregado ao obter bons resultados no processo de tratamento de efluentes contendo óleos e graxas, proporcionando assim que os corpos hídricos receptores mantenham-se em condições que não comprometam a qualidade da água e suas utilidades.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Reduzir e remover a concentração de óleos e graxas de efluente sintético através de adsorção, utilizando coluna de filtração com bagaço da cana-de-açúcar.

4.2 Objetivos Específicos

- Coletar e preparar o bagaço da cana-de-açúcar;
- Determinar características do adsorvente;
- Produzir e caracterizar o efluente empregado na pesquisa;
- Montar o sistema de filtração em coluna para tratamento de efluente sintético;
- Realizar a adsorção de óleos e graxas em coluna de filtração empregando o bagaço da cana-de-açúcar com granulometria de 0,60 mm.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Definição e problemática dos óleos e graxas

Para Melhenbacher (1977), óleos são substâncias químicas também chamadas de lipídeos que possuem em sua composição essencialmente ácidos graxos e glicerol.

Enquanto a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT) através da NBR 14063 (1998, p.2), que preconiza processos de tratamento para efluentes de mineração, define:

Óleos e graxas: Grupos de substâncias, de origem mineral, que incluem gorduras, graxas, ácidos, graxas livres, óleos minerais e outros materiais graxos, determinados em ensaios padronizados.

A definição química de óleo é muito abrangente segundo Waelkens (2010), que afirma encontrar diferentes classificações para esse produto, desde óleos de motor até óleos essenciais. Para ela, óleo são substâncias viscosas e insolúveis em água.

Óleos e graxas podem apresentar odor e aparência indesejável quando lançados nos corpos d'água, e ainda consumir o oxigênio indispensável para espécies aquáticas. Esses produtos possuem em sua composição compostos solúveis e insolúveis em água (ABNT, 1998).

Assim, esses produtos podem apresentar-se em água de forma livre ou emulsionada. A forma livre é a em que óleo e água permanecem em fases distintas, não havendo a mistura e sendo de fácil identificação, visto que o óleo permanece na superfície. Enquanto o óleo emulsionado caracteriza-se por apresentar-se disperso em água, formando uma mistura estável. A Figura 1 demonstra tais diferenças.

Figura 1 – Óleo livre e emulsionado



Fonte: Engenho Novo (2012).

A indústria de petróleo é grande geradora de resíduos contendo óleos e graxas, sendo de extrema importância um gerenciamento e manejo correto, visando o tratamento eficaz e disposição final adequada para que tais resíduos não provoquem danos ao meio ambiente (CARVALHO, 2014). Enquanto através da utilização de manteiga, óleos vegetais, carnes, entre outros produtos, as residências, os comércios e estabelecimentos alimentares também produzem óleos e graxas diariamente, muitas vezes despejando esses resíduos diretamente na rede de esgoto, prejudicando o funcionamento da rede. Há ainda a geração de efluentes contendo esses poluentes em diversos tipos de indústrias.

Os teores de óleos e graxas presentes em efluentes gerados em processos industriais variam consideravelmente de indústria para indústria. Indústrias de extração de óleos vegetais, por exemplo possuem um teor de óleos e graxas variando entre 500 a 16.000 mg/L. Enquanto indústrias de laticínios os teores variam de 200 a 4.000 mg/L (OLIVEIRA, J. P. *et al.* 2014). A Tabela 1 apresentará alguns teores de óleos e graxas em diferentes tipos de efluentes e até em efluentes de mesma espécie, mas em localidades diferentes.

Tabela 1 - Níveis de óleos e graxas determinados em diferentes efluentes

Tipo de Efluente	Concentração de óleos e graxas (mg/L)
Restaurante	98
Laticínios	4.680
Fábrica de batata frita	102 - 200
Fábrica de sorvete	845
Esgoto sanitário	55 -170
Esgoto sanitário	50 - 150
Esgoto sanitário	40 - 100
Indústria têxtil	9.000 – 50.000
Indústria têxtil	5.970 – 11.110

Fonte: Oliveira, J. P. *et al.* (2014)

O contato desses componentes oleosos e graxos com o meio ambiente, principalmente recursos hídricos, podem causar problemas imensuráveis, como por exemplo: prejuízo ao abastecimento de água potável para o ser humano, prejuízos aos organismos aquáticos, impactos sobre a qualidade de vida da população, influência negativa em atividades turísticas da região afetada, entre outros prejuízos (BONI, 2012).

Quanto aos prejuízos relacionados aos organismos aquáticos METCALF & EDDY (1991) explicam que o que prejudica esse ecossistema é o processo de decomposição de óleos e graxas presentes na água, o que acarreta na redução do oxigênio necessário à vida aquática, elevando a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Dessa forma, a adoção de medidas eficazes para o tratamento de efluentes que contenham óleos e graxas, bem como a proteção contra vazamentos desses poluentes, proporcionam a manutenção do equilíbrio ambiental e por consequência o bem-estar da população.

5.2 Disposição final do efluente com óleos e graxas

A resolução nº 430 (2011, p. 2) do CONAMA, define que “Efluente: é o termo usado para caracterizar os despejos líquidos provenientes de diversas atividades ou processos”.

Em geral todo efluente retorna a natureza por meio do lançamento em recursos hídricos. Para isso os efluentes precisam ser tratados, de forma a não prejudicar o meio ambiente.

O lançamento de efluentes em corpos hídricos deve atender certas condições previstas em resoluções, leis ou decretos com o objetivo de proteger a qualidade dos mananciais. As condições e padrões de lançamento de efluentes destinam-se a facilitar a fiscalização das fontes poluidoras (VON SPERLING, 1998).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes a nível nacional, estabelecendo ainda os parâmetros e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, determinando valores de concentração permitidos para parâmetros orgânicos e inorgânicos.

De acordo com a Tabela 2 é possível perceber que alguns órgãos municipais e estaduais preveem suas próprias condições sobre lançamento de efluentes, entretanto não se obteve informações do estado do Tocantins, sendo enquadrado como um estado sem legislação nesse quesito, devendo nesse caso seguir apenas o que dispõe a resolução CONAMA 430/2011.

Tabela 2 - Estados que possuem legislação sobre lançamento de efluentes

Legislação	Estados
Possuem legislação própria	SP, GO, SC, AL, RJ, ES (Vitória), RO, BA, PE, RS, MA, MG, PR, AM (Manaus), MS, CE.
Não possuem legislação própria	MT, PI, PB, PA, DF.
Não se obteve informação	AC, RR, AP, TO, RN, SE.

Fonte: Moraes (2017).

A resolução nº 430 (CONAMA, 2011) determina as condições de lançamento de efluentes em corpo receptor. No que diz respeito ao teor de óleos e graxas lançados de fontes poluidoras diretamente em efluentes, é permitido o lançamento de até 20 mg/L de óleos minerais, e até 50 mg/L de efluentes com presença de gorduras animais e óleos vegetais. Enquanto para o lançamento de efluentes provenientes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários (ETE), as condições de descarte para efluentes com presença de óleos e graxas é de no máximo 100 mg/L.

Estados que possuem legislação própria não podem permitir que sejam lançados efluentes em corpos receptores com maiores concentrações de poluentes que determina o CONAMA. Diante disso, o estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, através do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA, 2017), determina através da resolução nº 355 que efluentes líquidos com a presença de óleos e graxas somente podem ser lançados em corpos d'água com concentrações de no máximo 10 mg/L de óleos e graxas de origem mineral, e no máximo 30 mg/L para essas substâncias de origem vegetal ou animal.

O CONAMA (2007), através da resolução nº 393 dispõe também sobre o descarte de águas produzidas em plataformas de petróleo, permitindo o lançamento dessa água que possui em sua composição óleos e graxas, o teor de 29 mg/L mensal, através de média aritmética simples, e valor máximo diário de 42 mg de óleos e graxas por litro.

As residências geradoras de resíduos contendo óleos e graxas também possuem deveres quanto a utilização de produtos contendo essas substâncias, assim como qualquer indivíduo ou empresa que utiliza o meio ambiente para dispor seus resíduos, é o que estabelece o Decreto 7.404 (BRASIL, 2010), quando define que é responsabilidade dos consumidores, fabricantes, importadores, comerciantes, distribuidores e titulares de serviço público de limpeza urbana, o tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, devendo estes priorizar não gerar, reduzir, reutilizar e reciclar tais rejeitos.

5.3 Formas de tratamento de efluentes com óleos e graxas

A ABNT NBR 14063 (1998), indica o processo de tratamento de efluentes provenientes da indústria de mineração, em que o primeiro passo para o tratamento de óleos e graxas envolve a separação do óleo livre do disperso, e a forma de separação pode ser a mesma utilizada em Estações de Tratamento de Esgoto convencionais, onde há a presença de técnicas para sedimentação, flotação e centrifugação. O segundo processo é realizado com técnicas que visam quebrar as emulsões de óleo/água, que se caracteriza pela utilização de procedimentos químicos. Por fim, o tratamento terciário consiste na remoção de partículas de óleo dispersas e solúveis, para isso o tratamento é biológico.

O tratamento de efluentes com a presença de óleos e graxas oriundo das mais diversas atividades, pode funcionar assim como previsto para a indústria de mineração. Visto que provavelmente o que irá sofrer alteração será a quantidade em que esse resíduo se apresenta e consequentemente o tempo de tratamento.

Percebe-se que o tratamento de óleo emulsionado requer mais fases em comparação com o de óleo livre. Assim, enquanto a separação do óleo livre funciona como um processo físico, necessitando apenas de equipamentos que proporcionem condições para a separação por diferença de densidade, o óleo emulsionado necessita de técnicas de desestabilização da emulsão através de tratamentos químicos, e ainda quando necessário a utilização de tratamento biológico.

Quando acontece acidentes ambientais causados pelo vazamento de óleos outras medidas de tratamento devem ser tomadas. Segundo Boni (2012) são utilizados produtos químicos para quebrar as emulsões, ou ainda a queima do óleo, e também a utilização de equipamentos para aspirar o poluente. Outra opção que está sendo bastante estudada e com alto nível de aceitação para o tratamento de vazamentos de óleo é a adsorção, que funciona também para o tratamento de efluentes com óleos e graxas, e apresenta-se muitas vezes como um procedimento com maior economia.

5.4 Processo de adsorção

A adsorção é um processo onde ocorre a separação de elementos contidos em fluidos gasosos ou líquidos, através da utilização de determinados sólidos capazes de reterem esses elementos, propiciando a separação dos componentes desses fluídos. O material responsável por acumular as substâncias na sua interface é chamado de adsorvente, enquanto o que fica retido é denominado de adsorvato. Os adsorventes com maior superfície externa são mais favoráveis para propiciar a adsorção, por isso geralmente utiliza-se adsorventes sólidos e porosos (RUTHVEN, 1984).

Um dos processos mais eficazes para tratamento de águas residuais é a adsorção, sendo um método utilizado por indústrias para reduzir poluentes orgânicos e inorgânicos perigosos em efluentes (AHMARUZZAMAN; SHARMA, 2005).

O processo de adsorção não emprega produtos químicos e na maioria das vezes apresenta-se como um tratamento de baixo custo. A técnica tem se mostrado eficiente quanto a remoção de óleos liberados no solo e na água, e pode ser utilizado em diferentes aplicações, como para conter acidentes e vazamentos na forma de cinturões ou almofada, e para tratamento de efluentes aquosos em forma de coluna (BONI, 2012).

O tratamento de adsorção em águas residuais é geralmente considerado um processo de polimento para a água que já recebeu tratamento biológico natural. O processo de adsorção já foi utilizado para a remoção de constituintes orgânicos e inorgânicos residuais, como nitrogênio, sulfetos, metais pesados (METCALF & EDDY, 1991).

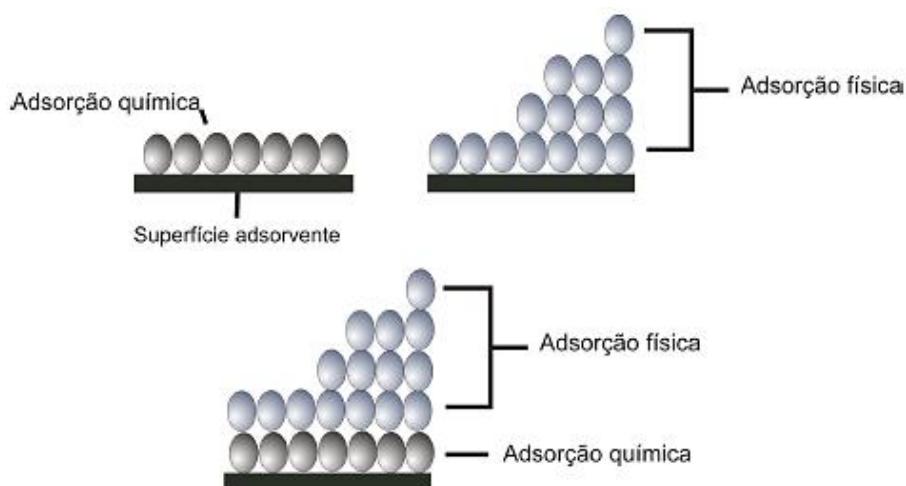
De acordo com Ruthven (1984) o processo de adsorção depende de fatores variados. Enquanto a qualidade e eficácia do adsorvente dependerá de características como porosidade, densidade e área superficial, a facilidade do adsorvato ficar retido dependerá de aspectos como o tamanho da molécula, acidez, polaridade, solubilidade.

O processo de adsorção pode ser classificado quanto a intensidade em dois tipos: adsorção química e física. A adsorção física é denominada de fisissorção, e acontece através da aderência do adsorvato no adsorvente por meio das forças de

Van der Waals, caracterizando-se por ligações intermoleculares relativamente fracas. Já a adsorção química, quimissorção, é uma ligação bem mais forte, pois ocorre a alteração molecular das substâncias envolvidas através da troca ou partilha de elétrons (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Guimarães (2015), demonstra na Figura 2 que na adsorção química as moléculas adsorvidas não são restritas pela superfície de contato acessível, enquanto na adsorção física há essa restrição, caracterizando-se pelo empilhamento das moléculas. Podendo ainda haver acima de uma camada adsorvida quimicamente a formação de multicamadas de adsorção física.

Figura 2 - Representação esquemática da formação de camadas no processo de adsorção por quimissorção e/ou fisissorção



Fonte: Guimarães (2015).

De acordo com Nascimento *et al.* (2014), os fenômenos de adsorção são consequência da combinação da fisissorção e quimissorção. Sendo assim, as condições operacionais dependem de fatores como: propriedades e natureza do adsorvente e do adsorvato, pH do meio, temperatura do sistema.

5.4.1 Tipos de adsorventes

De acordo com Foust (1982), vários são os adsorventes sólidos utilizados, sendo de extrema importância a escolha de qual empregar, pois para uma boa retenção do adsorvato a natureza do sólido deve ser cuidadosamente considerada, visto que os adsorventes se comportam de forma diferente com solutos específicos.

O primeiro adsorvente amplamente utilizado foi o carvão ativado. A aplicação sob a forma de carvão carbonizado de madeira foi descrita em 3750 a.C em um antigo papiro egípcio. Em diferentes períodos de tempo, o desenvolvimento da técnica de adsorção foi baseado em vários tipos de adsorventes: antes da Primeira Guerra Mundial em adsorventes de carbono, durante o período entre a Primeira Guerra Mundial e a Segunda Guerra Mundial com carbonos ativos, ácido de sílica géis e óxidos de alumínio (DABROWSKI, 2003).

Como já citado neste trabalho, o processo de adsorção é um método eficiente para o tratamento de águas, assim para torná-lo também um método econômico, devido ao elevado valor de alguns adsorventes, variados métodos estão sendo pesquisados, como é o caso da reutilização de subprodutos e resíduos agroindustriais, que nos dias atuais no Brasil e no mundo são produzidos em grande escala. Tais resíduos sem enquadrar como biomassas.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – (2008), biomassa é toda matéria orgânica, que possa ser utilizada para a produção de energia. E pode ser dividida de acordo com a origem em agrícola, florestal e em rejeitos urbanos e industriais.

A biomassa pode ser utilizada como um adsorvente, sendo chamada por alguns autores de bioadsorvente. Boni (2012) destaca que a utilização de materiais abundantes da natureza como adsorventes, é uma alternativa para a redução do teor de óleos e graxas de um efluente, pois é uma operação com custo baixo, além de dar utilidade aos resíduos provenientes da indústria agrícola e que muitas vezes não possuem destinação final adequada.

Existem diversos estudos sobre a utilização de biomassa como adsorvente. Alguns materiais mais utilizados nesses estudos foram mesocarpo de coco, sabugo de milho, serragem de madeira, bagaço da cana-de-açúcar e casca de banana.

Carvalho (2014), por exemplo estudou a remoção de contaminantes derivados do petróleo presentes em corpos d'água, através da reutilização do mesocarpo de coco como adsorvente. Capacidades de remoção dos contaminantes de até 70% para concentração de contaminante de 10%, e 100% de remoção para concentração de contaminantes de 3% e 5% foram os resultados obtidos.

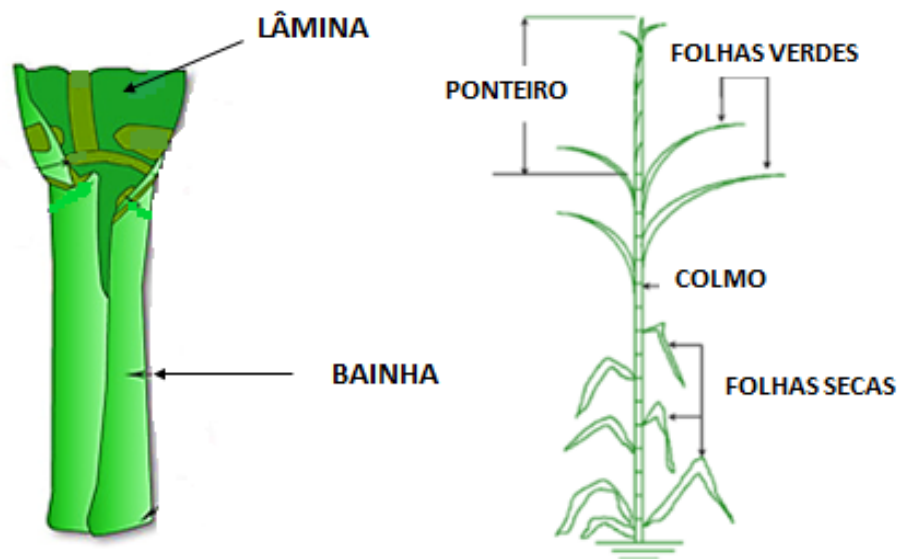
Assim como Santos *et al.* (2007) que estudou o desempenho de diferentes tipos de biomassa (sabugo de milho, serragem de madeira, mesocarpo do coco e o bagaço da cana-de-açúcar) para remover hidrocarbonetos leves em efluentes aquosos. Foi feito o estudo de adsorção com os resíduos *in natura* e após tratamento ácido, obtendo resultados um pouco melhores após o tratamento. A capacidade de adsorção do sabugo de milho e da serragem de madeira, tanto na forma natural como com o pré-tratamento, foram praticamente equivalentes, em torno de 8,0mL de hidrocarbonetos leves por grama de adsorvente. Enquanto o mesocarpo do coco e o bagaço de cana, com e sem pré-tratamento, resultou respectivamente em valores médios de 12,2 e 11,5mL de hidrocarbonetos leves por grama de adsorvente.

E Costa *et al.* (2012) analisou o uso da casca da banana como adsorvente em leito diferencial na adsorção de compostos orgânicos, e obteve resultados que apontaram a eficiência dessa biomassa. Em concentrações de 1% e 3% de compostos orgânicos houve 100% de remoção. E para concentrações de contaminante de 5% houve 75% de adsorção para a espessura do leito de 2mm, e 95% de adsorção para espessura de 3mm.

No Brasil a utilização do resíduo da cana-de-açúcar como adsorvente tem despertado bastante interesse dos pesquisadores, visto que esse produto é bastante gerado no país e muitas vezes não é utilizado para outros fins, como produção de energia.

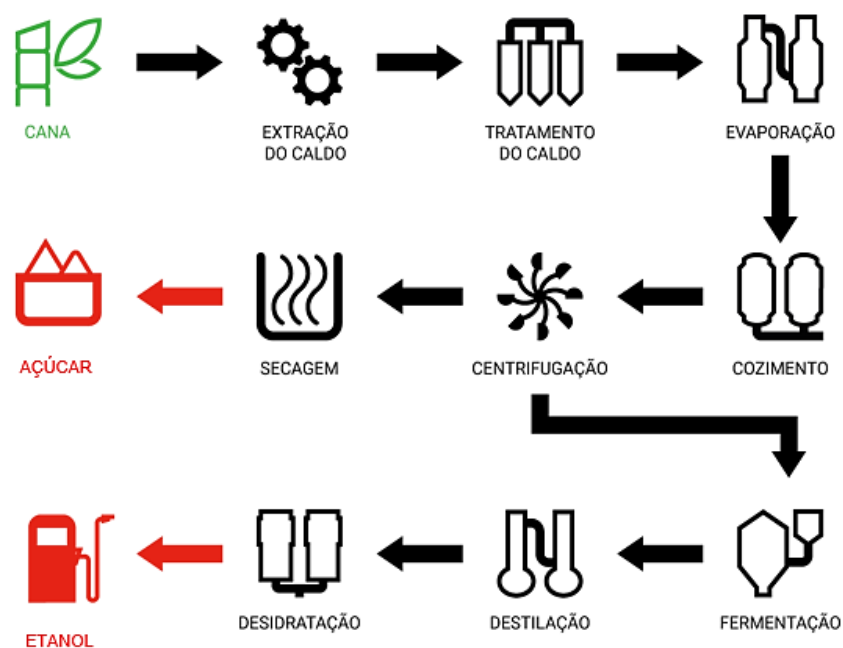
5.4.1.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar tem origem controversa, mas acredita-se que ela tenha se originado em ilhas da Polinésia e posteriormente foi levada ao Sul e Sudeste Asiático. A planta foi levada para a América por Cristóvão Colombo e se adaptou muito bem, por ser típica de climas tropicais e subtropicais. É uma planta da família Poaceae, e possui como nome científico: *Saccharum officinarum* L. A forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos, e as folhas divididas em lâminas e bainha são as principais características dessa família de plantas, que também é representada por outras culturas forrageiras, como o milho e o arroz (SILVA; SILVA, 2012). A Figura 3 representa a estrutura da planta conforme citado anteriormente.

Figura 3 - Estrutura da cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado de Casagrande (1991).

Da cana-de-açúcar extrai-se o popular caldo de cana, rico em sacarose, que pode ser transformado em açúcar ou álcool. Quando fermentado, o caldo transforma-se em álcool, e quando fervido para evaporação torna-se açúcar. O álcool é utilizado nas bebidas alcoólicas e também em combustível para abastecimento de carros, conhecido como etanol. Enquanto o açúcar é um produto indispensável na alimentação humana. Esse ciclo de produção pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Ciclo produtivo de açúcar e etanol

Fonte: Blog Instrumentação e Controle (2020).

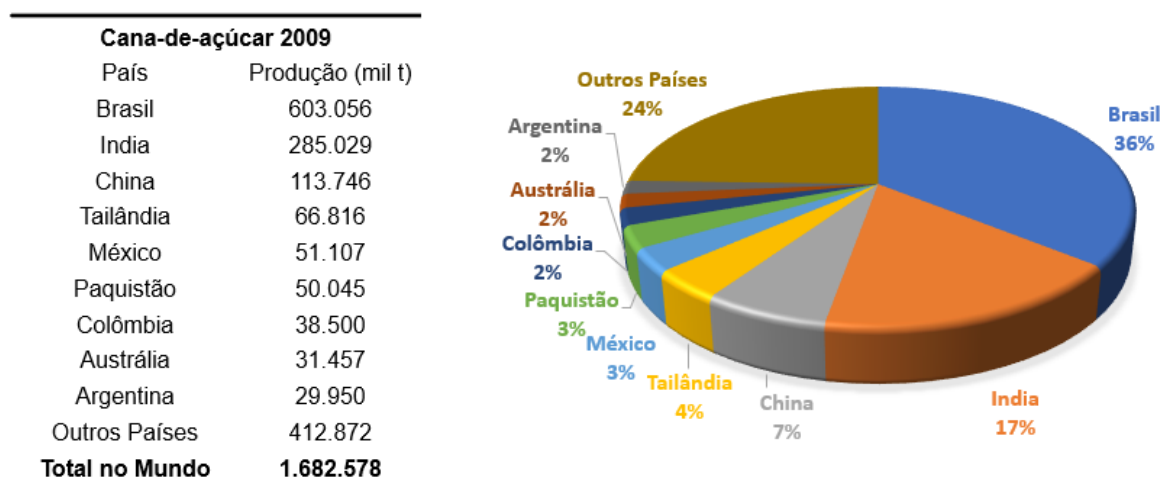
A partir da produção de álcool e açúcar resulta-se o bagaço, um material rico em fibras. De acordo com Cruz (2008) são gerados 280 kg de bagaço para cada tonelada de cana-de-açúcar moída.

Segunda a CONAB (2019), considera-se que a cana-de-açúcar é para o setor de biocombustíveis uma das grandes possibilidades, pois possui alta capacidade em produzir etanol e seus respectivos produtos, tornando-se assim uma planta de grande cultivo.

5.4.1.1.1 Cadeia produtiva da cana-de-açúcar

A maior produção mundial de cana-de-açúcar é realizada no Brasil (CONAB, 2018). O país possui grandes áreas para o cultivo, e ainda condições de solo e clima propícios ao plantio da cana-de-açúcar, tornando o Brasil um país poderoso na comercialização mundial dessa matéria-prima. A Figura 5 apresenta dados de 2009 da Organização Nacional das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) que mostram a superioridade da produção brasileira.

Figura 5 - Produção Mundial de cana-de-açúcar em 2009 (mil toneladas)

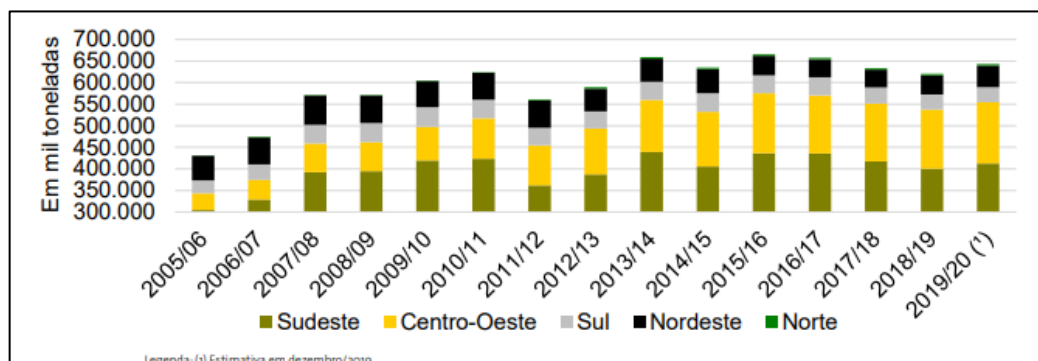


Fonte: Adaptado de FAO e MAPA (2009).

Observa-se que o Brasil e a Índia são os maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo, em conjunto são responsáveis pela produção de mais da metade do que é produzido mundialmente.

Na Figura 6 nota-se o aumento na produção da cana no Brasil e nas regiões do país entre 2005 e 2019. Onde é possível perceber que em 2019 o Brasil produziu quase 650 milhões de toneladas de cana.

Figura 6 - Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: CONAB (2019).

O Brasil além de ser o maior produtor mundial de cana é também o país que mais produz açúcar, e ainda, o segundo maior produtor de etanol (CGEE, 2009).

Na Figura 6 é possível perceber que a região do Brasil que menos produz cana-de-açúcar é a região Norte, e através da Tabela 3 identifica-se que o Tocantins é o maior produtor dessa região. Em 2019, a cana no estado do Tocantins contou com período de colheita de abril a novembro, produzindo aproximadamente 2,22 milhões de toneladas. A produção é restrita para a fabricação de etanol, totalizando um volume de 170,8 milhões de litros do combustível (CONAB, 2019). Dados relacionados a produção de cana na região norte podem ser obtidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Produção de cana nos anos de 2018 e 2019 na região norte

Região/UF	Área (em mil ha)		Produtividade (em kg/ha)		Produção (em mil t)	
	Safra 2018/19	Safra 2019/20	Safra 2018/19	Safra 2019/20	Safra 2018/19	Safra 2019/20
NORTE	49,6	46,3	66.932	78.741	3.317,83	3.644,15
RO	1,3	0	45.669	-	58,0	-
AM	3,5	3,5	67.294	83.620	236,9	293,5
PA	14,4	14,5	69.329	77.846	999,0	1.131,10
TO	30,4	28,2	66.642	78.596	2.039,90	2.219,50

Fonte: Adaptado de CONAB (2019).

5.4.1.1.2 Propriedades e aplicações do bagaço da cana-de-açúcar

Mesmo o Brasil sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o bagaço da cana, mostrado na Figura 7, ainda é um resíduo de baixa exploração e aproveitamento. De acordo com o CGEE (2009) esse subproduto é constituído por 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos.

Figura 7 - Bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Autora (2020).

Por ser um material rico em fibras, o bagaço pode ser utilizado para produzir energia elétrica. Entretanto, no Brasil, a produção de energia elétrica através da utilização desse material ainda é limitada, por falta de incentivo e investimento.

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em novembro de 2008 existiam 302 termelétricas movidas a biomassa no país, correspondente a um total de 5,7 mil megawatts instalados. Do total de usinas relacionadas, 252 eram movidas por bagaço de cana, o que correspondia a 4 mil megawatts.

O bagaço da cana-de-açúcar pode ser utilizado ainda para diversos fins, como a produção de adubo, alimentação para o gado, matéria-prima para a indústria de papel e celulose, e atualmente estudos tem comprovado a sua eficiência como adsorvente.

Estudos quanto a utilização de bagaço como adsorvente têm apontado para eficácia na remoção e redução de diversos produtos, como por exemplo: remoção de corante reativo azul 5G de águas residuais da indústria têxtil (SCHEUFELE *et al.*, 2014), remoção de corantes têxteis de efluentes industriais (SILVA *et al.*, 2011), remoção de chumbo de efluentes contendo metais pesados (PAZ *et al.*, 2018), e até redução da acidez de óleo residual para produção de biodiesel (OLIVEIRA, O. *et al.*, 2015).

5.4.2 Tipos de ensaios de adsorção

Os ensaios de adsorção realizados em laboratório podem ser classificados basicamente em dois tipos, experimento envolvendo batelada e coluna de filtração, mais conhecida como coluna de leito fixo. De acordo com Treybal (1955), conforme citado por Nascimento *et al.* (2014), experimentos realizados em leito fixo são amplamente utilizados para remoção de poluentes orgânicos contidos em efluentes líquidos. Normalmente esses sistemas são mais econômicos que os que utilizam o sistema de agitação em batelada.

O experimento em batelada caracteriza-se por ser um processo estacionário e para maiores tempos de contato com o líquido, sendo limitado ao tratamento de pequenos volumes de efluente, e não fornece dados exatos para dimensionamento dos sistemas contínuos de tratamento (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Ensaio em batelada são realizados com volume fixo de solução e massa de adsorvente determinada, com agitação, temperatura, pH e tempo de contato conhecidos (BORBA *et al.*, 2012).

A coluna de leito fixo, também chamada de coluna de filtração, é para Nascimento *et al.* (2014) um sistema onde partículas de determinado adsorvente são colocadas em uma coluna, seguido do contato com o fluído a ser tratado. Esse sistema é composto basicamente de um reservatório contendo a solução que será tratada, um mecanismo controlador de vazão e uma coluna contendo em seu interior a substância adsorvente. Pode haver ainda a presença de outro material nas extremidades da coluna, de forma que não permita o movimento do adsorvente. Gaspar (2003) afirma

que a vazão do fluido através da coluna pode ser feita de forma ascendente ou descendente.

Chama-se coluna de leito fixo pois utiliza-se uma vazão do líquido que não permita o movimento das partículas utilizadas como adsorvente (KLEINÜBING, 2006).

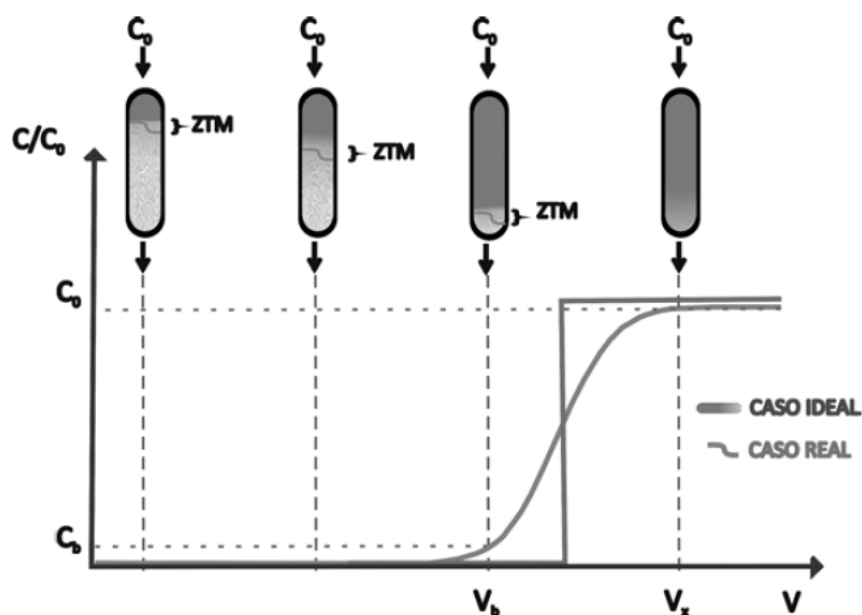
Dessa forma, prezando pela economia no processo de adsorção a utilização de coluna em leito fixo aliada a utilização de biomassa como adsorvente mostram-se eficazes nesse quesito.

5.4.3 Curva de ruptura

A curva de ruptura, breakthrough curves, é utilizada para avaliar a eficácia de ensaio de adsorção em coluna de filtração. A curva de ruptura, como pode ser observado na Figura 8, é uma relação entre a razão da concentração de saída (C) pela concentração de entrada (C_0), e o tempo de operação ou volume tratado.

Através da Figura 8 é possível perceber que no início do ensaio de adsorção em coluna de filtração a massa de adsorvente atinge altas taxas de remoção do soluto, atingindo grande redução na concentração do material indesejado, e no decorrer do tempo de ensaio a taxa de remoção minimiza até chegar a saturação do adsorvente.

Figura 8 - Curva de ruptura para adsorção em coluna de filtração



Fonte: Nascimento *et al.* (2014).

A zona de transferência de massa (ZTM) é a região onde ocorre a remoção de massa em função do tempo. De acordo com Nascimento *et al.* (2014), o desempenho de uma coluna de leito fixo está atrelado ao comprimento e a forma como se comporta a ZTM. A ZTM está situada entre a zona de adsorvente da coluna que está saturada e a zona que ainda se encontra não saturada, sendo essa região o setor em que ocorre maior retenção do soluto. É possível perceber que a ZTM atingiu o final da coluna quando a quantidade de soluto no efluente começa a aumentar de forma gradual.

Considera-se que o ponto que o sistema atinge a ruptura (V_b) é quando a concentração do adsorvato é de 5% ou a concentração máxima permitida de um poluente no efluente. A ruptura para óleos e graxas de efluentes provenientes de ETE, por exemplo, em um efluente com concentração de 10000 mg/L poderia ser de 1% da concentração inicial, pois como já citado, as condições de lançamento para esse tipo de poluente conforme o CONAMA é de no máximo 100 mg/L.

E no ponto V_x o sistema atinge a saturação ou exaustão do leito adsorvente, onde há uma concentração de aproximadamente 90% de C_0 .

Ao fim do ensaio a curva de ruptura demonstra a forma da ZTM. Quanto mais o formato da curva apresentar-se fechado significa que o adsorvente apresenta pouca resistência para aceitar a transferência de massa, enquanto um formato de curva mais aberto significa maior resistência à transferência. Quanto menor a ZTM mais próximo ao ideal (NASCIMENTO *et al.* 2014)

5.5 Adsorção de óleos e graxas com bagaço da cana-de-açúcar

As características da cana-de-açúcar, o alto de índice de produção no Brasil, e a economia para o processo, indicam que o bagaço da planta é uma opção que pode ser utilizada como adsorvente.

Algumas pesquisas utilizando o bagaço da cana como adsorvente para remoção de componentes oleosos e graxos presentes em efluentes já foram realizadas através dos dois tipos de ensaios aqui citados, obtendo-se resultados satisfatórios.

Boni (2012) por exemplo, estudou a redução do teor de óleos e graxas presentes em efluentes aquosos através da utilização do bagaço da cana em processo de adsorção por meio do ensaio de batelada. O efluente sintético foi simulado através de uma dispersão de água destilada e decahidronaftaleno, com concentração inicial de 890 mg/L. Empregou-se para a remoção dos poluentes, partículas de tamanho 600 e 710 μm , com massa do adsorvente variando de 0,05 a 1,0 g e agitação de 120 rpm. Obtendo bons resultados com a mistura das duas granulometrias, alcançando capacidade de adsorção de 80% de óleo em apenas 5 minutos de contato entre o efluente e a biomassa. Ainda foi estimada a capacidade máxima de adsorção de 6,65 g de hidrocarboneto por grama de adsorvente.

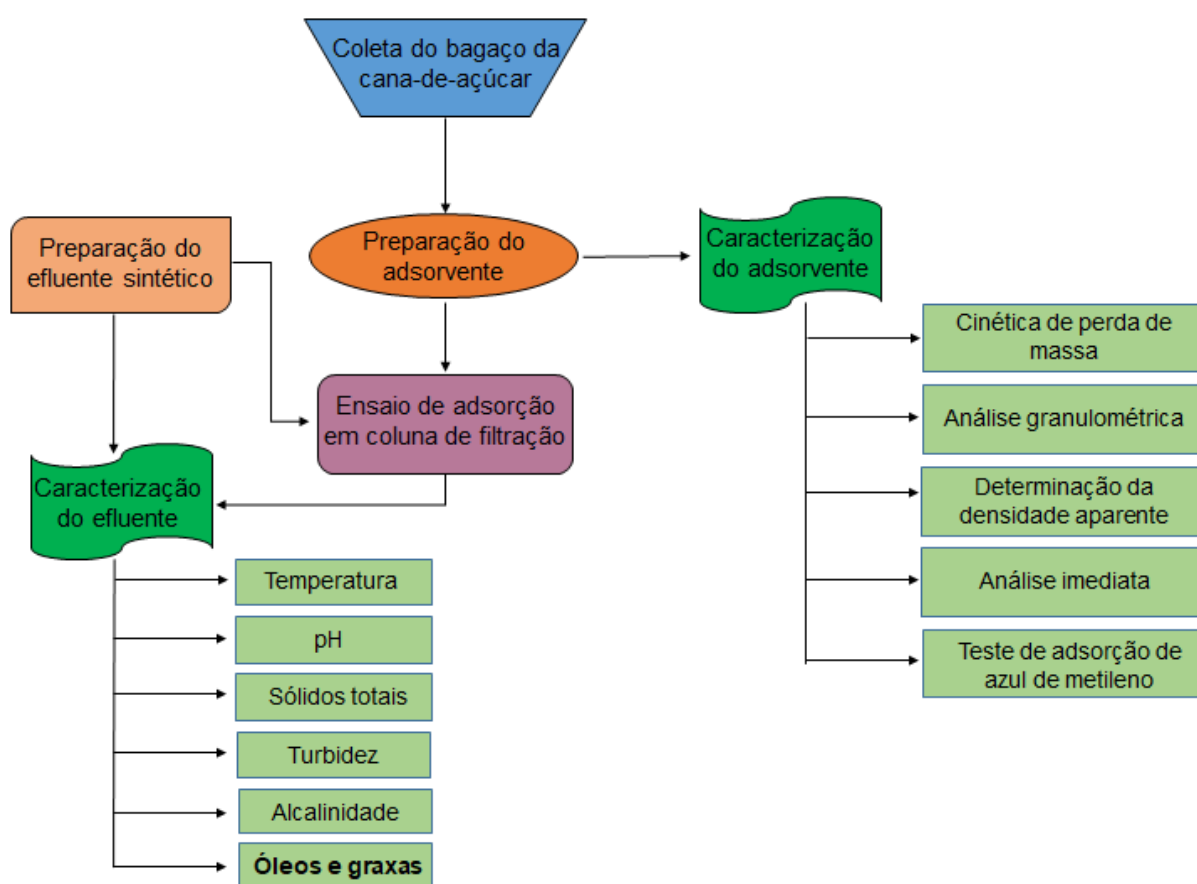
Almeida *et al.* (2019) similarmente estudou a utilização de resíduo sólido da cana (bagaço) como adsorvente para tratamento de água produzida por indústrias de petróleo. O efluente utilizado foi produzido sinteticamente de forma a obter 200-400 mg/L de óleo. Os testes foram realizados em batelada com 0,2 g do adsorvente em 200mL de água produzida sob agitação constante a 110 rpm e com granulometria de 0,850 mm. Após 5 minutos de contato mais de 90% do óleo emulsionado presente na mistura foi removido. O máximo da capacidade de adsorção obtida foi de 207,3 mg/g.

Enquanto que Rodriguez (2017) também determinou a potencialidade de adsorção do bagaço de cana-de-açúcar na remoção de óleos e graxas de efluente sintético em ensaios de batelada e em coluna de leito fixo. O estudo dele comparou a capacidade de adsorção do bagaço com diferentes granulometrias (1,4; 1,19; 1,00 e 0,85 mm) e diferentes massas (0,5; 1; 2; 3; 4 e 5 g). O efluente foi simulado através da mistura de 250 mg/L de óleo em água. Para o experimento em leito fixo utilizou-se duas colunas de diâmetro diferente, resultando em resultados superiores para a coluna de maior diâmetro. Em geral, a melhor remoção obtida nos ensaios foi para a granulometria de 1,4 mm, e a melhor dosagem de massa de 5 g. O estudo obteve bons resultados tanto no ensaio de coluna como no de batelada, concluindo que o bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizado como adsorvente para remoção de óleos e graxas.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo trata dos procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa, abordando os materiais utilizados, preparação, caracterização e os procedimentos realizados para avaliar a adsorção de óleos e graxas utilizando o bagaço da cana-de-açúcar como adsorvente. O diagrama esquemático da metodologia proposta pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Desenho esquemático das atividades desenvolvidas



Fonte: Autora (2020).

6.1 Coleta do bagaço da cana-de-açúcar

O bagaço da cana-de-açúcar foi coletado na região norte da cidade de Palmas - TO, mais precisamente na quadra 107 Norte ou ARNO 13. O bagaço foi armazenado em sacos plásticos e encaminhado até o laboratório de análises de águas, localizado

no Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas, local esse em que aconteceu a maioria dos ensaios dessa pesquisa.

6.2 Preparação do adsorvente

O resíduo da cana obtido após a moagem é encontrado com resquícios do caldo e com a presença de materiais indesejáveis em sua superfície. Por isso é necessário que a preparação do bagaço seja iniciada com uma limpeza. Assim o bagaço foi submetido a lavagem com água corrente, seguida de imersão em água por 12 horas, para na sequência ser enxaguado com água corrente novamente, garantindo assim a limpeza total do produto.

Posterior a fase de limpeza, executou-se a secagem do bagaço com circulação de ar, por meio de estufa de secagem e esterilização modelo SL 100, à temperatura de 60 °C, por 72 horas. As Figuras 10 e 11 mostram alguns passos para a preparação do adsorvente.

Por fim, realizou-se a trituração do bagaço, por meio da utilização de liquidificador, resultando em diferentes tamanhos do sólido.

Figura 10 - Limpeza do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Autora (2020).

Figura 11 - Secagem do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Autora (2020).

6.3 Caracterização do adsorvente

Os procedimentos citados nesse capítulo, que visam determinar a densidade aparente, o teor de umidade, o teor de material volátil, o teor de cinzas, o teor de carbono fixo e o teste de adsorção de azul de metileno foram realizados utilizando a amostra triturada e peneirada, retida em peneira com abertura da malha de 0,60 mm, conforme indicado por Pedroza (2011).

6.3.1 Cinética de perda de massa

A cinética de perda de massa da biomassa foi realizada em duplicata com a finalidade de comparar as porcentagens de perda de massa ao longo do tempo. Os ensaios foram feitos em estufa de secagem, modelo SL 100, e na temperatura de 50°C. Para aquecer o bagaço da cana-de-açúcar efetuou-se a sua fragmentação após a limpeza, colocando-o em cadinhos de porcelana, como mostra a Figura 12. Os tempos de aquecimento adotados nessa pesquisa foram 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9 h. Após

o aquecimento do material num determinado intervalo de tempo, o cadinho era então resfriado em dessecador e pesado em balança analítica.

Figura 12 - Biomassa utilizada no ensaio



Fonte: Autora (2020).

6.3.2 Análise granulométrica

Após o bagaço encontrar-se no estado triturado, ocorreu a análise granulométrica, que consistiu primeiramente, na divisão da amostra em algumas partes, de forma que a quantidade utilizada não atrapalhe o ensaio ficando retida nas peneiras quantidade que impeça a passagem do material, sendo que a totalidade da amostra foi ensaiada.

O material ensaiado seguiu as recomendações da ABNT NBR NM 248 (2003) que determina a composição granulométrica de agregados para produção de concreto. Foram utilizadas peneiras padronizadas, como mostra a Figura 13, com abertura de 2,36 mm; 1,40 mm; 0,85 mm; 0,60 mm e 0,30 mm, encaixadas uma sobre a outra com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, possuindo um fundo de peneira abaixo do conjunto para coletar as partículas finas.

Figura 13 - Peneiras padronizadas



Fonte: Autora (2020).

Colocou-se uma quantidade conhecida da amostra sobre a peneira superior do conjunto, posteriormente uma peneira por vez, com um fundo, sofreu agitação manual por 2 minutos, iniciando-se essa agitação pela peneira de maior abertura e seguindo em ordem decrescente, a agitação da peneira foi feita em movimentos alternantes laterais e circulares. Por fim, determinou-se a massa retida em cada peneira.

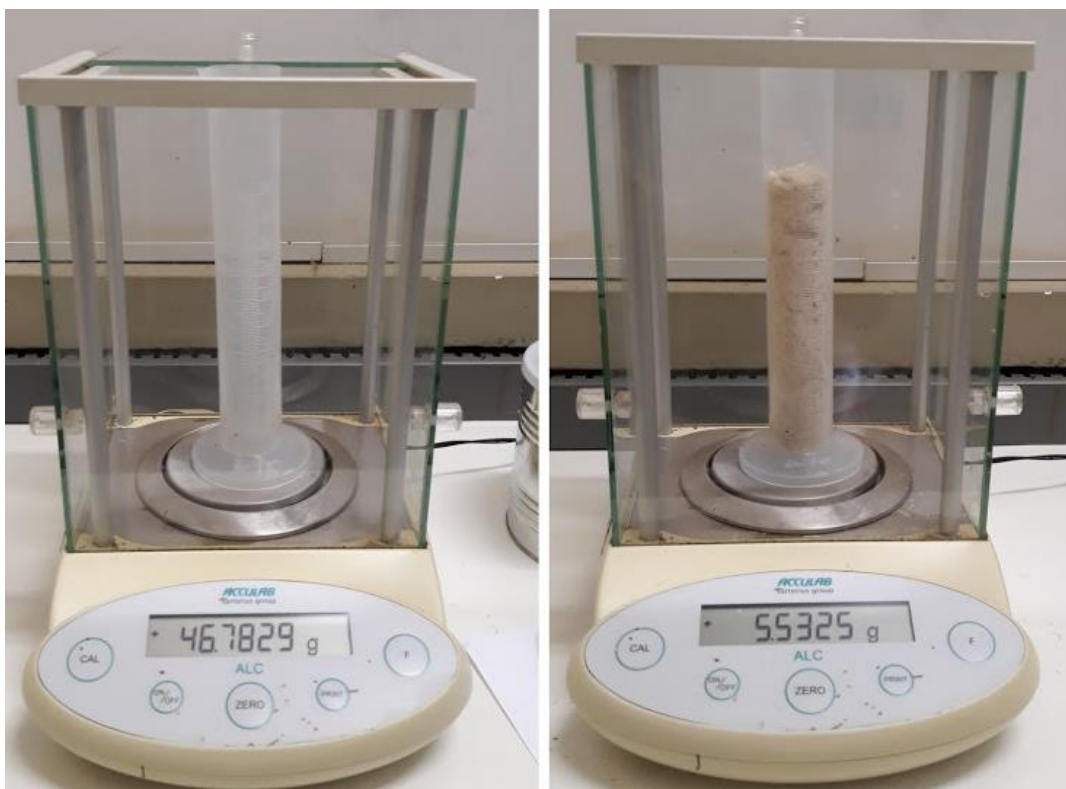
O bagaço peneirado foi acondicionado em recipientes plásticos rotulados com as respectivas granulometrias.

6.3.3 Determinação da densidade aparente

A determinação da densidade aparente consistiu na utilização de uma proveta de 100 mL, como mostrada na Figura 14, colocada sobre uma balança analítica

zerada, depois adicionou-se o bagaço de 10 em 10 mL, em que nas sucessivas adições foram obtidas as respectivas massas, em gramas. Por fim, através da relação entre massa e volume foi possível obter a densidade aparente por meio de média aritmética simples.

Figura 14 - Proveta de 100 mL vazia e com o bagaço triturado e peneirado



Fonte: Autora (2020).

6.3.4 Análise imediata

A análise imediata mede os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo presentes em uma amostra de biomassa.

De acordo com Nogueira e Rendeiro (2008), o Brasil não possui normas regulamentadoras para realizar a análise imediata de biomassa *in natura*, sendo necessário seguir normas internacionais (ASTM) e a NBR 8112:1986 (ABNT) que determina a análise imediata de carvão vegetal.

6.3.4.1 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-87 (1991). A análise baseia-se na quantidade de massa perdida ao aquecer a amostra com temperatura controlada.

O procedimento consistiu em colocar aproximadamente 1 grama do material em um cadinho de porcelana, previamente seco e pesado em balança. Em seguida colocou-se o conjunto em estufa pré-aquecida à temperatura constante de 110 °C por 1 hora. Após o tempo estabelecido, transferiu-se o material da estufa para um dessecador por 15 minutos, e por fim efetuou-se a pesagem do conjunto e foi obtida a massa final do material. O procedimento foi realizado em triplicata e obteve-se o teor de umidade através de média aritmética simples das três porcentagens de umidade, que foram obtidas por meio da Equação 1, descrita abaixo:

$$\% \text{ umidade} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A = massa inicial da amostra, em gramas;

B = massa da amostra após o aquecimento, em gramas.

6.3.4.2 Teor de material volátil

Para determinação do teor de material volátil do bagaço triturado, seguiu-se a metodologia proposta por Nogueira e Rendeiro (2008), que se baseia na NBR 8112 (1986). Onde os três conjuntos de cadinho e amostra utilizados no ensaio de umidade foram submetidos ao aquecimento em mufla a temperatura de 850 °C durante 7 minutos sem presença de oxigênio, ou seja, os cadinhos ficaram tampados, como pode ser visto na Figura 15. Após os conjuntos resfriarem em dessecador determinou-se a massa final. O teor de material volátil é determinado medindo-se a quantidade de biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra de quantidade conhecida e previamente seca. Assim, ao fim do ensaio restaram apenas as cinzas e

o carbono fixo, como mostrado na Figura 16. A porcentagem de material volátil foi determinada por meio da Equação 2 descrita abaixo:

$$\% \text{ material volátil} = \frac{B-C}{A} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A = massa inicial da amostra antes do ensaio de umidade, em gramas;

B = massa da amostra após o aquecimento do teor de umidade, em gramas;

C = massa da amostra após o aquecimento em mufla, em gramas.

Figura 15 - Cadinhos com amostra submetidos ao aquecimento



Fonte: Autora (2020).

Figura 16 - Amostra após o aquecimento



Fonte: Autora (2020).

6.3.4.3 Teor de cinzas

A cinza de um material orgânico refere-se ao resíduo inorgânico ou mineral que permanece após a queima em mufla a altas temperaturas, como mostra a Figura 17. Para determinação de cinzas de acordo com o exposto por Nogueira e Rendeiro (2008) e regido pela NBR 8112 (1986), foram colocados na mufla a temperatura de 710 °C por 1 hora os conjuntos de cadinho e amostra sem umidade e materiais voláteis. Após os conjuntos atingirem a temperatura ambiente em dessecador foi possível pesá-los para obter a porcentagem de cinzas de acordo com a Equação 3 descrita a seguir:

$$\% \text{ cinzas} = \frac{D-E}{A} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

D = massa do conjunto após a queima, em gramas;

E = massa do cadinho vazio, em gramas;

A = massa inicial da amostra antes do ensaio de umidade, em gramas.

Figura 17 - Amostra após ensaio de teor de cinzas



Fonte: Autora (2020).

6.3.4.4 Teor de carbono fixo

A partir dos resultados obtidos nos três ensaios anteriores foi possível determinar o teor de carbono fixo (CF) presente no resíduo. O cálculo consistiu em somar as porcentagens de umidade, cinzas e material volátil, subtraindo o valor da soma por 100, conforme a Equação 4:

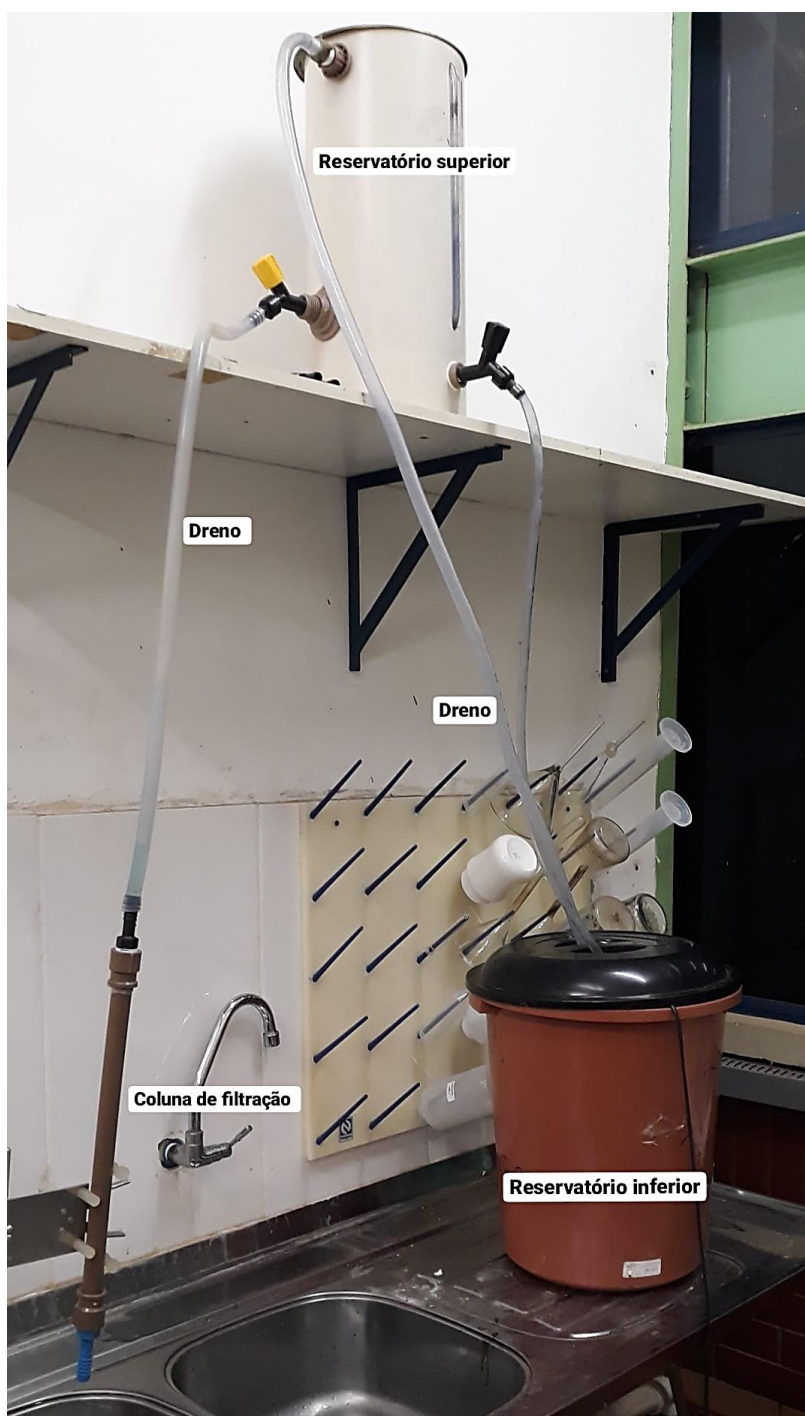
$$\% CF = 100 - (\% \text{ umidade} + \% \text{ material volátil} + \% \text{ cinzas}) \quad (\text{Equação 4})$$

6.3.5 Teste de adsorção de azul de metileno

Seguindo a metodologia proposta por Rodrigues (2019), o teste foi realizado utilizando coluna de filtração descendente contendo em seu interior o bagaço triturado com granulometria de 0,60 mm e areia com granulometria de 2 mm. Realizou-se o ensaio com a utilização de corante em concentrações de 10 mg/L e 2 mg/L dissolvidos em água destilada. Para o experimento empregou-se o sistema apresentado na Figura 18, composto por reservatório inferior de 50 litros, ligado por drenos ao reservatório superior de 20 litros que também é ligado por drenos à coluna contendo bagaço e areia. Para propiciar o recalque do corante do reservatório inferior para o superior

instalou-se uma bomba submersa no primeiro reservatório. A alimentação da coluna foi feita através de gravidade. A coluna foi confeccionada com altura total de 30 cm e diâmetro de 1,7 cm, composta por bagaço com 22 cm de altura e 4 cm de areia embaixo e em cima do bagaço. Para a montagem da coluna utilizou-se aproximadamente 3 gramas do bagaço. A vazão média de saída da coluna foi mantida em 10 mL/min em fluxo contínuo.

Figura 18 - Sistema de filtração de azul de metileno em bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Autora (2020).

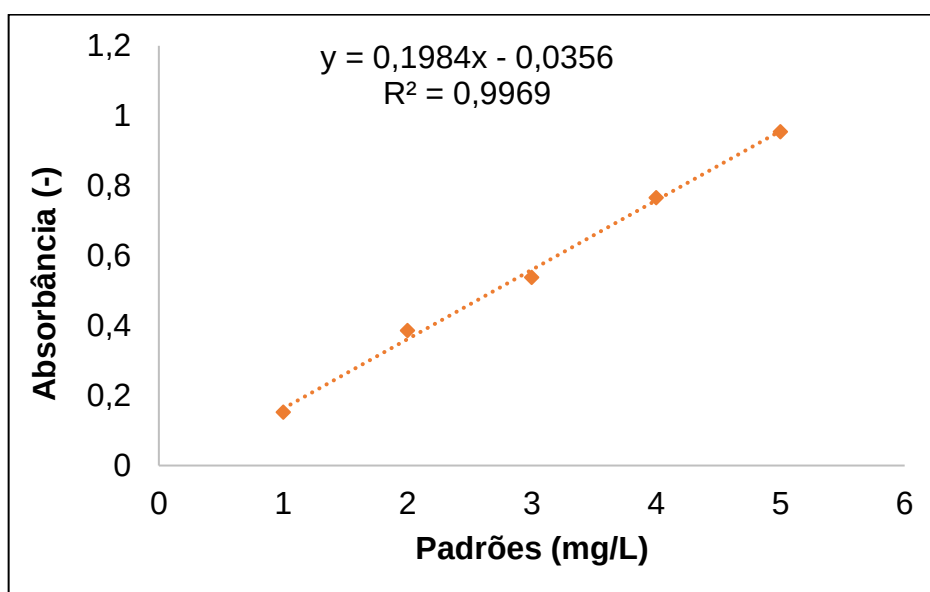
A adsorção da solução de corante foi obtida através da leitura de absorbância em espectrofotômetro PERKIN ELMER, LAMBDA 750, de duplo feixe em 660 nm, com o auxílio de uma curva de calibração externa desenvolvida pela análise de soluções de corante com concentrações de 1, 2, 3, 4 e 5 mg/L, como mostram as Figuras 19 e 20. A primeira leitura foi efetuada após 60 min de funcionamento do sistema e sucessivamente a cada 30 min.

Figura 19 - Padrões utilizados para confecção da curva de calibração



Fonte: Autora (2020).

Figura 20 - Curva de calibração para teste de adsorção de azul de metileno



Fonte: Autora (2020).

6.4 Preparação do efluente sintético

Para a produção do efluente sintético utilizou-se óleo lubrificante de peças, mostrado na Figura 21, utilizado pelo curso de engenharia elétrica do IFTO. Os componentes principais da água produzida foram o óleo lubrificante e água de abastecimento.

Figura 21 – Óleo lubrificante utilizado para preparação do efluente sintético



Fonte: Autora (2020).

Preparou-se o efluente com 150 mg/L do óleo sintético, de forma a simular um efluente doméstico, assim como apresentado na Tabela 1, conforme Oliveira, J. P. *et al.* (2014). Entretanto, ao efetuar a leitura de concentração do efluente após a sua preparação, o mesmo apresentou a concentração de 167,5 mg/L.

Para promover a agitação e mistura dos dois componentes do efluente sintético utilizou-se um reservatório de 50 litros contendo agitador mecânico instalado, que permaneceu ligado ao longo de todo o processo de adsorção, de forma que o óleo e a água mantiveram-se emulsionados.

6.5 Caracterização do efluente

O efluente sintético foi caracterizado em seu estado bruto e também no decorrer do processo de adsorção. O efluente tratado foi caracterizado cinco vezes, sendo a última caracterização feita com o volume final ensaiado. Os métodos analíticos aplicados para caracterização do efluente estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Métodos analíticos para caracterização do efluente

PARÂMETRO ANALÍTICO	METODOLOGIA
Temperatura (°C)	Termômetro de mercúrio
pH (-)	Eletrométrico
Sólidos Totais (mg/L)	Gravimétrico
Turbidez (uT)	Nefelométrico
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Volumétrico
Óleos e Graxas (mg/L)	Espectrofotométrico

Fonte: Autora (2020).

Os equipamentos utilizados para as análises são mostrados nas Figuras de 22 a 27.

Figura 22 – Condutivímetro para análise da temperatura



Fonte: Autora (2020).

Figura 23 - Medidor de pH



Fonte: Autora (2020).

Figura 24 - Banho maria utilizado para ensaio de sólidos totais



Fonte: Autora (2020).

Figura 25 - Turbidímetro



Fonte: Autora (2020).

Figura 26 - Agitador magnético utilizado para análise de alcalinidade



Fonte: Autora (2020).

Figura 27 - Espectrofotômetro para análise de óleos e graxas

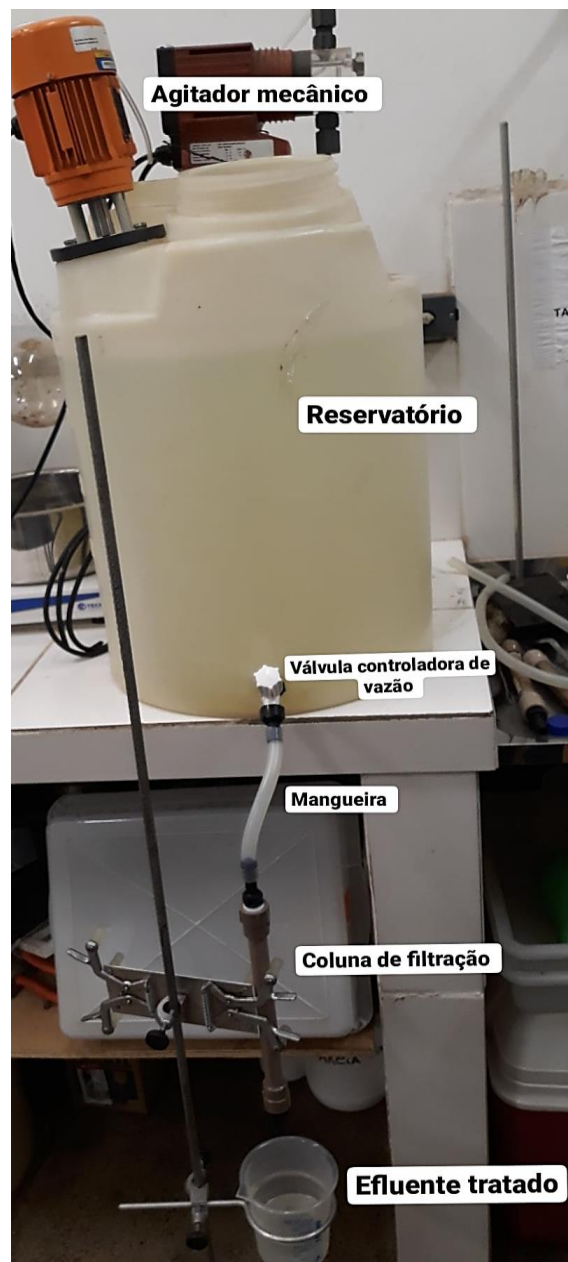


Fonte: Autora (2020).

6.6 Ensaio de adsorção em coluna de filtração

Para os testes de adsorção continuou-se utilizando o reservatório de 50 litros contendo um agitador mecânico instalado como equipamento auxiliar para a mistura constante do efluente sintético. O ensaio foi realizado em fluxo descendente na coluna de filtração e a vazão de saída do efluente foi controlada durante todo o ensaio. A Figura 28 apresenta o sistema utilizado no ensaio de adsorção em coluna de filtração.

Figura 28 - Sistema do experimento de adsorção em coluna de filtração

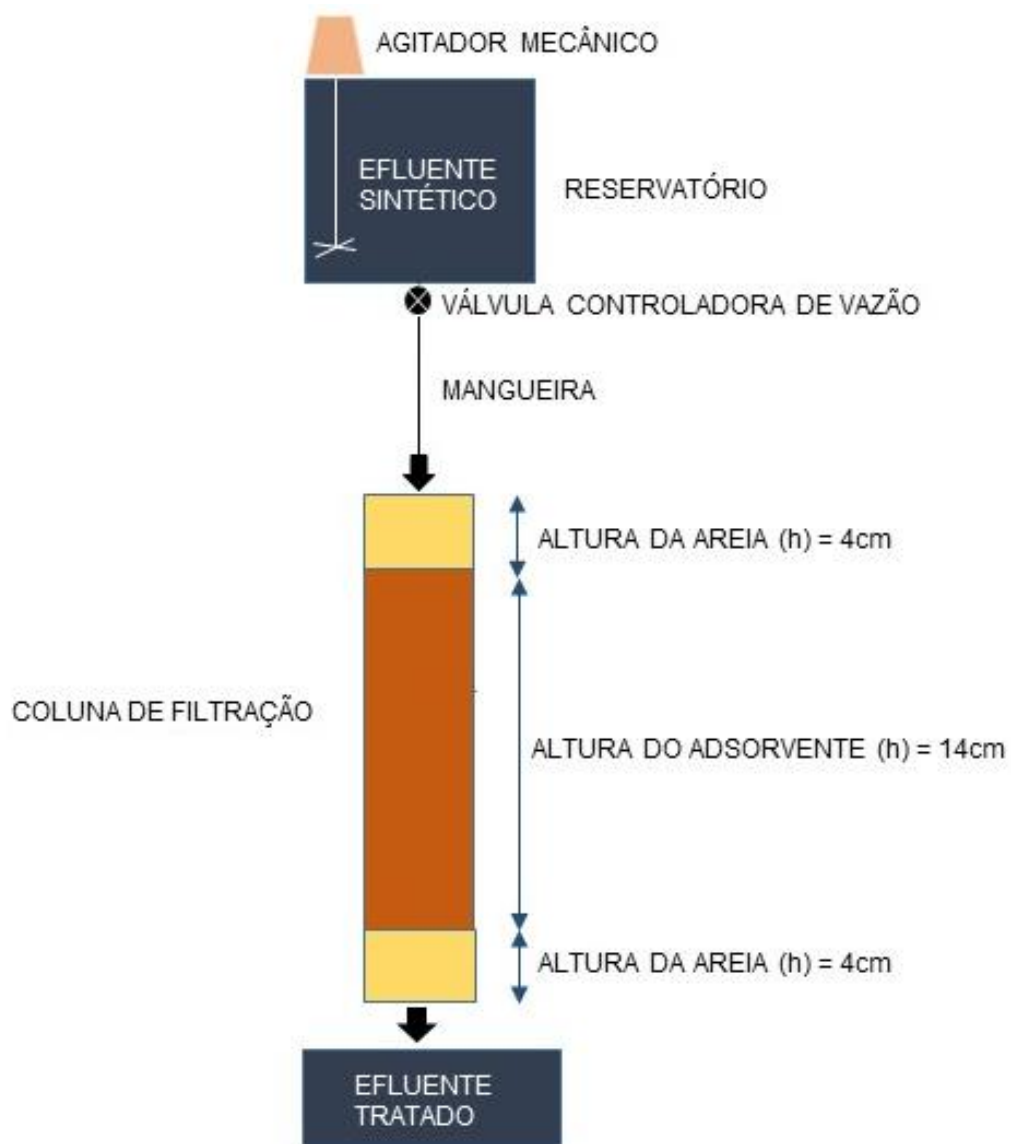


Fonte: Autora (2020).

Empregou-se durante os ensaios de adsorção em coluna a granulometria de bagaço de 0,60 mm, proposta por Boni (2012). E areia com granulometria de 2 mm.

Sendo assim, a coluna de ensaio foi confeccionada com cano pvc possuindo altura total de 22 cm e diâmetro de 1,7 cm, e recebeu no seu interior: areia com altura de 4 cm no fundo, seguida do bagaço da cana com altura de 14 cm, e derradeiramente outra camada de areia com a mesma altura do fundo. Tal disposição da coluna pode ser observada na Figura 29.

Figura 29 - Esquema do experimento de adsorção em coluna de filtração



Fonte: Autora (2020).

Inseriu-se na coluna o efluente sintético de concentração inicial (C_0) de 167,5 mg/L a uma vazão volumétrica média (Q) de aproximadamente 6,6 mL/min.

Inicialmente, a cada 250mL de efluente tratado realizou-se a coleta para análise em espectrofotômetro a fim de determinar a concentração de óleo remanescente (C) em mg/L, após perceber que a concentração mantinha-se zerada o volume analisado aumentou sem padronização. O procedimento foi efetuado por aproximadamente 95 horas, filtrando 37.250 mL do efluente sintético. O resumo dos parâmetros físicos do sistema de coluna de filtração com bagaço da cana está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros físicos do sistema de coluna de filtração com bagaço da cana-de-açúcar

Parâmetro	Valor	Unidade
Concentração inicial de óleos e graxas (C₀)	167,5	mg/L
Diâmetro interno da coluna	1,7	cm
Granulometria do adsorvente	0,6	mm
Altura total da coluna	22,0	cm
Comprimento do leito de bagaço	14,0	cm
Massa do adsorvente na coluna	1,81	g
Massa total de areia na coluna	31,6	g
Vazão média de operação (Q)	6,6	mL/min

Fonte: Autora (2020).

6.6.1 Determinação da concentração de óleos e graxas

A análise da concentração de óleos e graxas presentes na fase aquosa baseou-se na metodologia desenvolvida por Curbelo (2002). Este método consiste em utilizar clorofórmio como solvente a fim de extrair o óleo emulsionado presente no efluente,

para em seguida efetuar a análise de absorvância em espectrofotômetro DR 6000, com comprimento de onda de 300 nm.

Para extração do óleo emulsionado através do emprego de clorofórmio, utilizou-se funil de separação, apresentado na Figura 30, como auxiliar para promover a agitação do solvente com o efluente a ser analisado e como separador do óleo e da fase aquosa. A técnica de separação consistiu em colocar no funil 1 mL de ácido clorídrico e 10 mL de clorofórmio para cada 100 mL do efluente, em seguida agitar manualmente o conjunto e deixá-lo descansar por 10 min para a separação das fases, e posteriormente efetuar a leitura da absorvância.

Figura 30 - Funil de separação

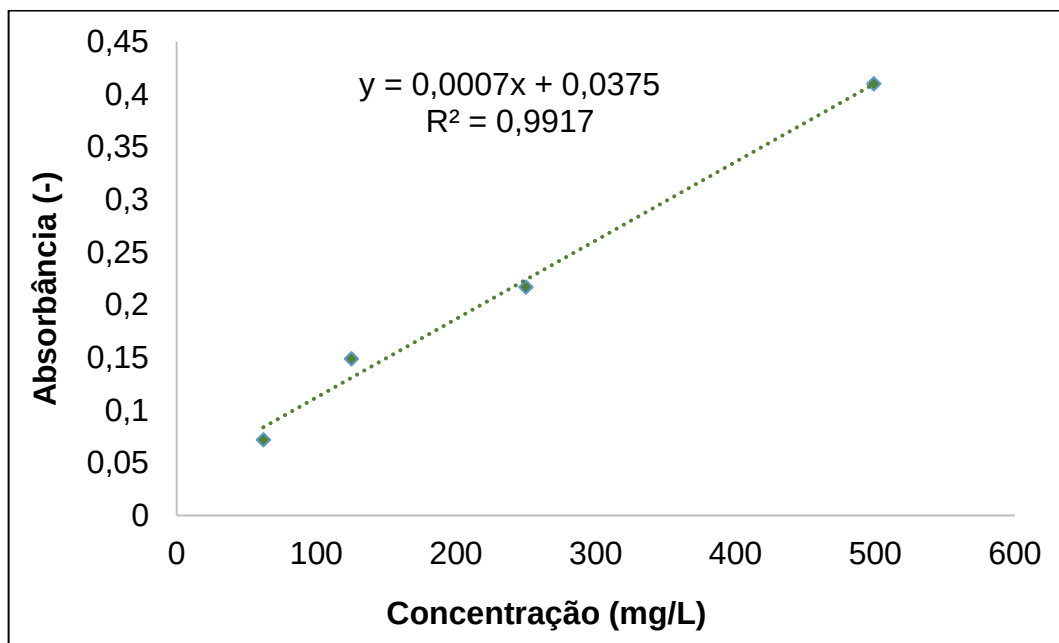


Fonte: Autora (2020).

Para a determinação da concentração de óleos e graxas no efluentes, foi realizada a construção de uma curva de calibração, partindo-se de 04 padrões de

concentrações conhecidas (62 mg/L, 125 mg/L, 250 mg/L e 499 mg/L), conforme a Figura 31.

Figura 31 - Curva de calibração para ensaio de adsorção de óleos e graxas



Fonte: Autora (2020).

Após a obtenção dos resultados obtidos, gerou-se a curva de ruptura do sistema, relacionando C/C_0 (adimensional) *versus* V_{tratado} (L) e também a curva de eficiência, que relaciona a eficiência (%) *versus* V_{tratado} (L).

É interessante relatar que para obter a concentração de óleos e graxas após substituir a absorbância lida no espectrofotômetro na equação obtida com a curva de calibração, é necessário ainda relacionar o valor encontrado com a com a quantidade de clorofórmio usada e com o volume de efluente ensaiado. Ou seja, sabendo que o valor de “y” na equação apresentada na Figura 31 é a absorbância lida e “x” a concentração em mg/L, significa que a concentração resultante de óleos e graxas está em 1000 mL do clorofórmio, entretanto não é utilizada toda essa quantidade do solvente, sendo necessário efetuar a relação através de regra de três simples, e após obter o valor relacionado é preciso novamente relacioná-lo, agora com o volume de efluente utilizado na análise, de forma a obter a concentração do poluente em mg/L.

6.6.2 Determinação da capacidade de adsorção

De acordo com Araújo *et al.* (2017) a capacidade adsorptiva real da coluna pode ser calculada a partir da obtenção do volume de fluido tratado até o momento em que o adsorvente sofre saturação. Relacionando esse volume com a concentração de soluto no efluente e à massa do adsorvente, tem-se a Equação 5:

$$q_{col} = \frac{C_o \times V_{sat}}{m} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

q_{col} = capacidade de adsorção da coluna (mg/g);

C_o = concentração de entrada do soluto no efluente (mg/L);

V_{sat} = volume de saturação (L);

m = massa do adsorvente na coluna (g).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da caracterização do adsorvente em cinética de perda de massa, análise granulométrica, densidade aparente, análise imediata, teste de adsorção de azul de metileno e finalmente expõe a caracterização do efluente sintético antes e após o ensaio de adsorção de óleos e graxas em coluna de filtração, e ainda discute a eficiência de tal ensaio.

O trabalho iniciou-se com a coleta e preparação do bagaço da cana-de-açúcar, assim como descrito nos itens 6.1 e 6.2 do Capítulo 6. E posteriormente deu-se início aos ensaios.

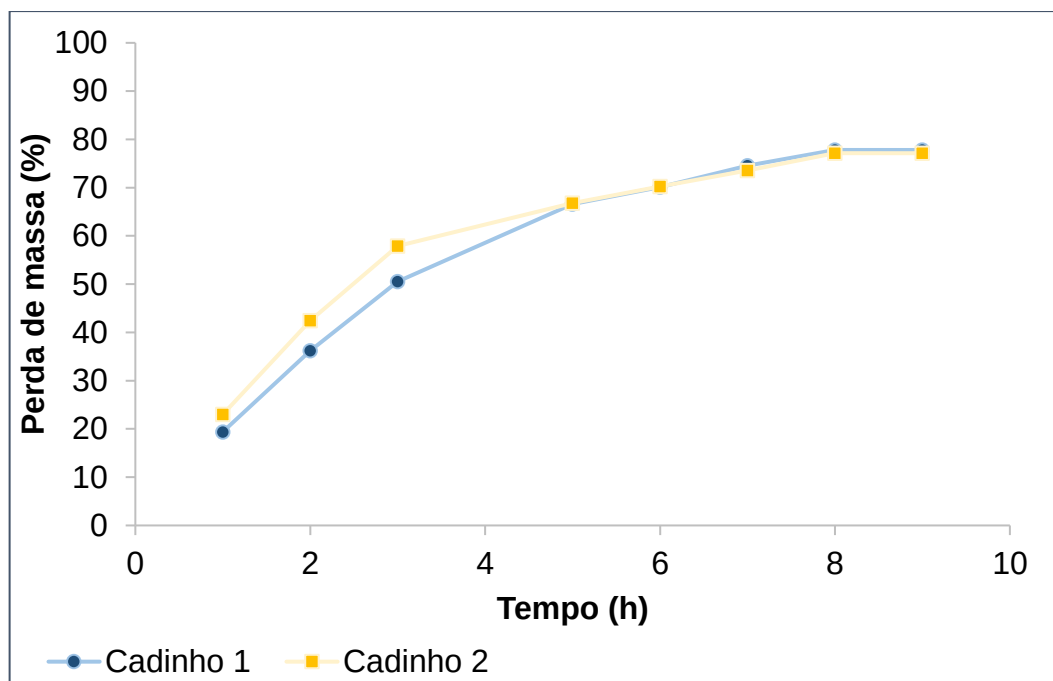
7.1 Caracterização do adsorvente

7.1.1 Cinética de perda de massa

Para utilizar a biomassa como um adsorvente mais eficiente é necessário efetuar a secagem em estufa da mesma, de forma a obter um produto com o mínimo possível de umidade. Diante disso, conhecer o comportamento de perda de massa em função do tempo da biomassa é de extrema importância, visto que a secagem em estufa é um processo térmico que consome bastante energia, aumentando o custo do processo.

A Figura 32 apresenta a curva de secagem da biomassa em função do tempo, a temperatura constante de 50 °C, como descrito no item 6.3.1. Observa-se que os resultados obtidos para os dois cadinhos foram próximos, o que demonstra que a amostra de biomassa utilizada representa a totalidade coletada.

O comportamento da biomassa apresentado na Figura 32, indica que a mesma sofre maior perda de massa nos intervalos de tempo iniciais, tendendo a moderar a perda após 5 horas de secagem. A perda de massa média após 1 hora de secagem foi de 21,2 % e 8 horas após foi de 77,5 %, o que demonstra que a perda de massa não é proporcional ao avanço do tempo.

Figura 32 - Perda de massa em função do tempo

Fonte: Autora (2020).

Através do ensaio de cinética de perda de massa é possível então definir o melhor momento para encerrar o procedimento, e assim não consumir energia desnecessariamente.

Ainda, através dessa análise e da definição do tempo de secagem é possível prever a quantidade necessária de biomassa a ser colocada em estufa de forma a obter o total desejado após o processo de perda de massa. Por exemplo, se o tempo definido for de 6 horas a porcentagem de massa perdida será de aproximadamente 70%, portanto, se a quantidade de bagaço seco esperado for de 1000 kg, deve-se colocar em estufa aproximadamente 3334 kg da biomassa.

7.1.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada assim como especificado no item 6.3.2 do Capítulo 6. Utilizou-se uma amostra de bagaço triturado que totalizou em 118,619 g de massa, sendo necessário dividir a amostra para ser ensaiada em três partes. As massas retidas em cada peneira nos três ensaios do material heterogêneo foram somadas e estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado da análise granulométrica realizada para o bagaço da cana-de-açúcar triturado

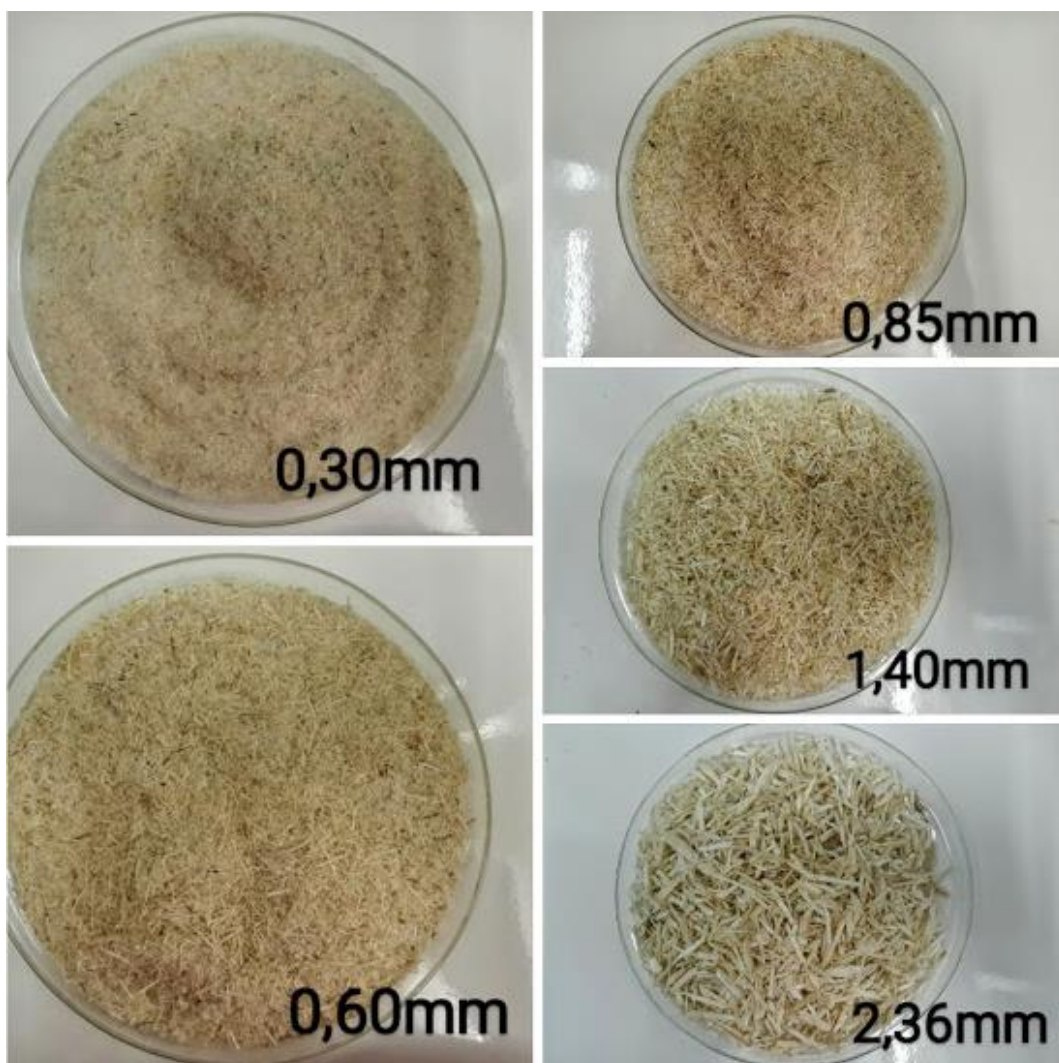
Abertura peneira (mm)	Tyler (<i>mesh</i>)	Intervalo de diâmetro (Tyler)	Massa retida (g)	Fração retida (%)
2,36	08	+ 08	46,097	39,21
1,40	14	- 08 + 14	33,787	28,74
0,85	20	- 14 + 20	20,242	17,22
0,60	28	- 20 + 28	7,246	6,16
0,30	48	- 28 + 48	6,935	5,90
Fundo		- 48	3,261	2,77
Total			117,568	100

Fonte: Autora (2020).

Através da Tabela 6 é possível perceber que a amostra triturada é constituída em maior parte por grandes diâmetros, isso se deve ao equipamento utilizado para a trituração. Também é notório que a massa ao final do ensaio não foi a mesma do início, isso aconteceu devido ao processo de agitação manual das peneiras, pois em cada agitação saiam minúsculas partículas através de pequenos espaços impossíveis de vedar entre a tampa e a peneira, contudo essa perda não prejudica a análise, pois além de ter sido pouca quantidade perdida em relação a massa total, também corresponderia a um material fino que se encontraria apenas no fundo.

A Figura 33 mostra o bagaço após o ensaio granulométrico, em que é possível analisar que a biomassa retida na peneira de 2,36 mm possui grandes dimensões, enquanto que a da peneira de 0,30 mm é próxima ao pó. Também se percebe que o bagaço da granulometria de 0,60 mm, utilizada nos próximos ensaios, é composto por pequenas fibras alongadas.

Figura 33 - Bagaço após análise granulométrica



Fonte: Autora (2020).

7.1.3 Determinação da densidade aparente

A determinação da densidade aparente do bagaço de cana foi realizada com a granulometria de 0,60 mm, assim como descrito no item 6.3.3 do Capítulo 6. O valor da densidade obtido foi de 0,0570 g/mL, sendo determinado a partir da média dos valores apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado da análise de densidade aparente do bagaço da cana

Volume (mL)	Massa (g)	Densidade (g/mL)
10	0,5585	0,0559
20	1,0939	0,0547
30	1,8582	0,0619
40	2,4738	0,0618
50	3,0135	0,0603
60	3,3322	0,0555
70	3,8339	0,0548
80	4,4122	0,0552
90	4,8871	0,0543
100	5,5324	0,0553
Densidade média (g/mL)		0,0570

Fonte: Autora (2020).

Na tabela 7 observa-se uma densidade média calculada de 0,0570 g/mL, o que equivale a 57 kg/m³. Enquanto Alarcon *et al.* (2006), encontrou uma densidade aparente de 69 kg/m³ para o bagaço da cana-de-açúcar de diâmetro 0,63 mm não compactado.

Rodriguez (2017), comparou a densidade de bagaço da cana-de-açúcar de cinco granulometrias distintas, percebendo que a densidade aumenta à medida que o diâmetro da partícula diminui. Diante disso, a menor densidade obtida nesse trabalho se comparada a encontrada pelo outro autor, pode ser explicada por haver partículas com diâmetros maiores, visto que a amostra utilizada para a análise de densidade aparente possui diâmetros entre os intervalos de 0,84 mm a 0,60 mm.

7.1.4 Análise imediata

Os valores médios obtidos nessa pesquisa para o teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo do bagaço da cana estão apresentados na Tabela 8, assim como resultados provenientes de outras pesquisas.

Tabela 8 - Resultados da análise imediata

Variável analítica	Resultados dessa pesquisa (%)	Outros resultados (%)		
Teor de umidade	8,48	8,20 (Katyal; Thambimuthu;Valix, 2003).	6,98 (Vieira, 2012)	8,58 (Silva, 2017)
Teor de material volátil	84,21	83,10 (Katyal; Thambimuthu;Valix, 2003)	81,80 (García -Pérez <i>et al.</i> , 2002)	76,92 (Silva, 2017)
Teor de cinzas	1,53	4,20 (Katyal; Thambimuthu;Valix, 2003).	2,30 (García -Pérez <i>et al.</i> , 2002)	7,90 (Silva, 2017)
Teor de carbono fixo	5,77	12,70 (Katyal; Thambimuthu;Valix, 2003).	15,90 (García -Pérez <i>et al.</i> , 2002)	15,18 (Silva, 2017)

Fonte: Autora (2020).

Observa-se na Tabela 8 que os resultados da análise imediata obtidos neste e em outros trabalhos estão próximos, o que proporciona confiabilidade aos dados alcançados. A variável que mais se distanciou, se comparado aos outros trabalhos, foi o teor de carbono fixo, entretanto essa discrepância pode ser explicada, uma vez que os resultados obtidos por outros autores não consideram a amostra úmida, ou seja, para o cálculo do teor de carbono fixo a equação não aplica o teor de umidade.

O teor médio de umidade relativamente baixo para um produto que possui em sua composição inicial alta quantidade de água, é explicado pela sua origem e ainda pela forma de preparação para utilização como adsorvente, uma vez que o bagaço resultou da moagem da cana-de-açúcar para obtenção do caldo e ainda passou pelo processo de secagem em estufa para maior eficácia como adsorvente.

Percebe-se que a biomassa apresenta um alto teor de material volátil, o que significa que apresenta baixo ponto de ebulição e consequentemente maior facilidade de queima.

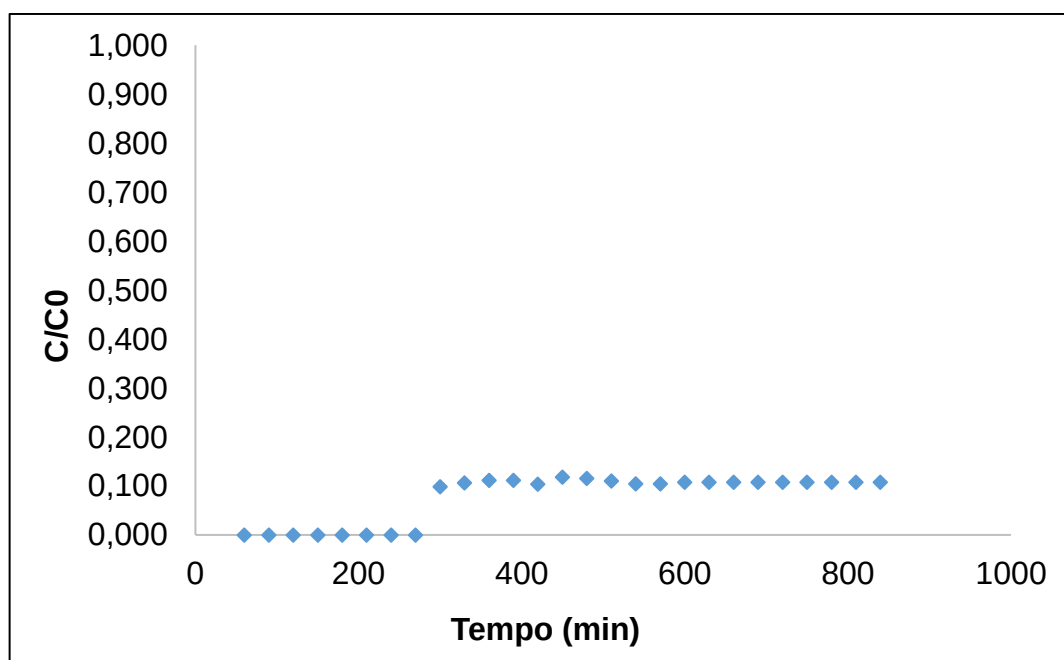
O teor médio de cinzas obtido nesse trabalho foi o menor, se comparado aos outros resultados. A variação de resultados pode ser explicada pelo bagaço ser um material constituído por diferentes frações fibrosas (KATYAL; THAMBIMUTHU; VALIX, 2003).

Por fim, obteve-se o teor de carbono fixo da amostra, que representa a massa restante após os ensaios de umidade, material volátil e cinzas. Como citado anteriormente, o método utilizado pelos outros autores para obter essa variável foi diferente. Os resultados de teor de carbono fixo para Katyal; Thambimuthu; Valix (2003), García-Pérez *et al.* (2002) e Silva (2017) se fosse considerado o teor de umidade da amostra seriam respectivamente de 4,50 %, 8,92 % e 6,60 %. Desse modo, observa-se a proximidade com o valor obtido neste trabalho.

7.1.5 Teste de adsorção de azul de metileno

As Figuras 34 e 35 mostram as curvas de ruptura do teste de adsorção de azul de metileno em coluna de filtração utilizando o bagaço da cana-de-açúcar com granulometria de 0,60 mm, para adsorção das concentrações de corante de 2 mg/L e 10 mg/L, e com vazão de saída do efluente controlada de 10 mL/min.

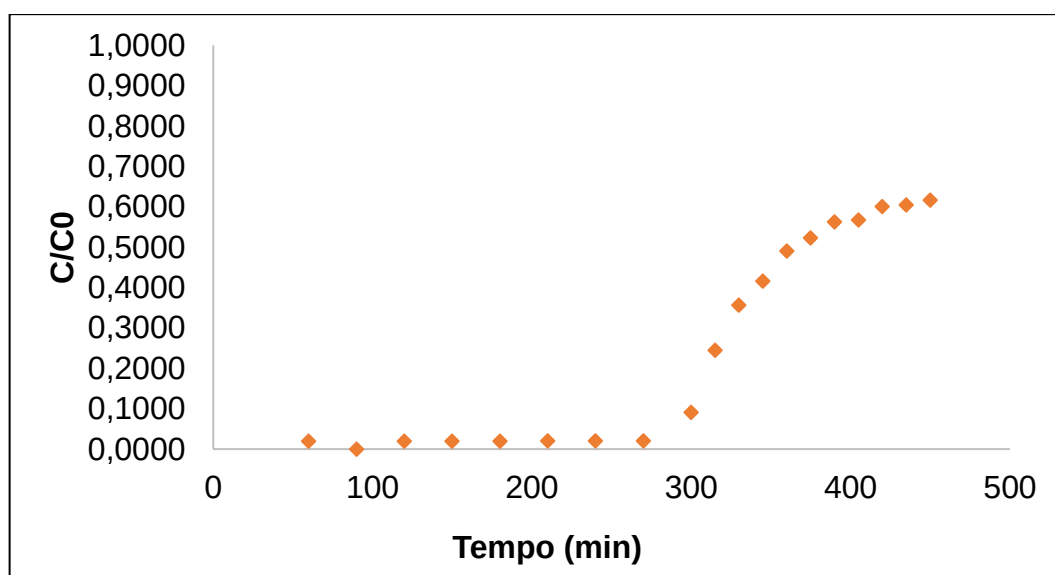
Figura 34 - Curva de ruptura para concentração de 2 mg/L



Fonte: Autora (2020).

O sistema de adsorção de azul de metileno para a concentração de 2 mg/L permaneceu em operação durante 14 horas. A primeira leitura do efluente tratado foi efetuada com 60 min de funcionamento e posteriormente a cada 30 min foram realizadas novas leituras, sendo conferida e mantida a vazão de saída de 10 mL/min a cada nova leitura. O início da saturação do bagaço por moléculas de corante se deu por volta dos 300 min de funcionamento do sistema, mantendo-se com aproximadamente 89 % de eficiência de remoção do azul de metileno até o final do ensaio aos 840 min. O ponto de ruptura (V_b), também foi no tempo de 300 min, ao apresentar a concentração de 0,19 mg/L, visto que a ruptura do sistema acontece quando a concentração do adsorvato é de 5% da concentração inicial, ou seja de 0,1 mg/L, como mencionado no item 5.4.3.

Figura 35 - Curva de ruptura para concentração de 10 mg/L



Fonte: Autora (2020).

Para a concentração de 10 mg/L de azul de metileno o sistema foi desligado após 450 min de ensaio. Percebe-se através da Figura 35, que a concentração de corante final (C) se manteve até aproximadamente 270 min com capacidade de remoção máxima, iniciando a saturação do bagaço por volta de 300 min. O ponto de ruptura (V_b) para a concentração de 10 mg/L seria quando a concentração de saída apresentasse 0,5 mg de corante/L, o que conseqüentemente também aconteceu aos 300 min, ao apresentar concentração de 0,87 mg/L. Assim como para a concentração de 2 mg/L, a leitura inicial foi efetuada aos 60 min de funcionamento e posteriormente a cada 30 min, mantendo-se a vazão de saída constante de 10 mL/min, entretanto,

após os 300 min de funcionamento, onde iniciou-se a saturação, o tempo de leitura foi encurtado para a cada 15 min, de forma que a análise do aumento de concentração fosse mais eficaz e perceptível. Assim, ao final do ensaio a menor eficiência de remoção medida foi de 38 %.

Percebe-se através dos dois ensaios que com o aumento da concentração de corante há um avanço maior da curva de ruptura após o início da saturação do adsorvente, mostrando que para uma mesma quantidade de adsorvente, o volume de solução a ser tratado com concentração de 10 mg/L é menor do que o com 2 mg/L do azul de metileno.

Após o encerramento do teste de adsorção de azul de metileno foi possível analisar a coloração do adsorvente utilizado nas duas colunas de filtração, como pode ser visto na Figura 36, e assim certificar-se que o bagaço realmente foi o responsável por reter em sua superfície o corante.

Figura 36 - Bagaço da cana após o teste de adsorção de azul de metileno



Fonte: Autora (2020).

7.2 Caracterização do efluente

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do efluente sintético e do efluente tratado são apresentados na Tabela 9. Percebe-se, inicialmente, que o

processo de filtração apresentou resultado nulo até o final do ensaio de adsorção em coluna de filtração.

Tabela 9 - Resultados da caracterização do efluente

Volume filtrado (mL)	Temperatura (°C)	pH (-)	Sólidos Totais (mg/L)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mgCaCO₃/L)	Óleos e graxas (mg/L)
Efluente bruto	27,7	6,1	147,5	1,5	13	167,5
3450	29,1	6,8	86,5	0,8	12	0,0
11900	27,3	6,2	30,0	0,71	12	0,0
25600	27,5	6,7	46,0	0,74	12	0,0
35050	26,8	6,9	60,0	0,79	13	0,0
37250	26,1	6,5	74,0	0,8	13	0,0

Fonte: Autora (2020).

A caracterização do efluente bruto quanto a concentração de óleos e graxas demonstrou que o mesmo apresenta concentração um pouco mais elevada do que o que foi idealizado no momento da sua produção. Dessa forma, para a relação entre C/C_0 foi considerada a concentração (C) real obtida de 167,5 mg/L.

Os resultados auferidos de temperatura situam-se entre 29,1 e 26,1. Para o lançamento de efluentes em corpos d'água a resolução CONAMA 430 (2011) determina que a temperatura seja inferior a 40 °C. Dessa forma, as temperaturas encontradas são aceitáveis para o lançamento do efluente no corpo receptor.

Os valores de pH obtidos encontram-se entre 6,1 e 6,9, o que caracteriza o efluente como uma solução ácida e próxima à neutralidade. A resolução CONAMA 430 (2011), estabelece para a descarga de efluentes pH situado entre 5 e 9. Diante disso, no que diz respeito ao parâmetro pH, o efluente no estado bruto e após o processo de adsorção estaria atendendo à condição imposta para o lançamento em corpos receptores.

Como era previsto, os sólidos totais apresentam-se em maior quantidade no efluente bruto. O que também era previsível e foi confirmado, foi a relação entre o parâmetro turbidez e a quantidade de sólidos totais, indicando que quanto menor a quantidade de sólidos totais no efluente, menor também será a sua turbidez.

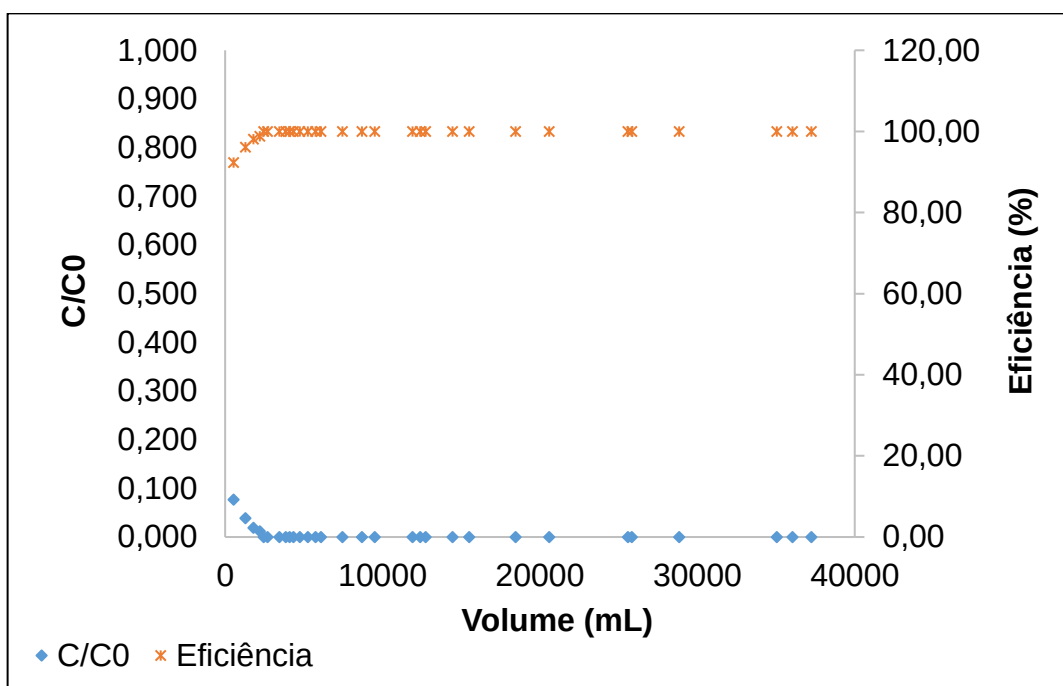
Assim como o pH a alcalinidade do efluente manteve-se com pouca alteração.

Os resultados das análises de óleos e graxas serão discutidos no item 7.3, entretanto já é possível perceber que a utilização do bagaço da cana-de-açúcar como adsorvente resultou em 100 % de eficiência de remoção de óleos e graxas até o final do ensaio de adsorção, filtrando quase 38 litros do efluente com concentração de 167,5 mg/L do poluente. Sendo assim, o efluente tratado com o bagaço da cana-de-açúcar através do processo de adsorção, está apto ao lançamento em corpos receptores no quesito concentração de óleos e graxas, visto que como já foi citado no item 5.2 a resolução CONAMA (2011) permite o lançamento de até 20 mg/L de óleos minerais, e até 50 mg/L de efluentes com presença de gorduras animais e óleos vegetais lançados de fontes poluidoras diretamente em efluentes. E para o lançamento de efluentes provenientes ETE, as condições de lançamento para efluentes com presença de óleos e graxas é de no máximo 100 mg/L.

7.3 Ensaio de adsorção em coluna de filtração

A coluna de filtração confeccionada para o trabalho mostrou-se eficaz na remoção de óleos e graxas do efluente. Segunda Patrícia (2016), os dois materiais presentes na coluna (areia e bagaço da cana) desempenham diferentes funções no processo de tratamento do efluente. A areia além de propiciar o empacotamento do adsorvente também funciona como um filtro inicial que remove as partículas de óleo que estão em suspensão no efluente, permitindo que o bagaço funcione apenas como adsorvente.

A Figura 37 apresenta os dados experimentais obtidos durante o monitoramento da coluna de filtração empregando o bagaço da cana-de-açúcar como um adsorvente de óleos e graxas.

Figura 37 - Curva de ruptura e de eficiência

Fonte: Autora (2020).

A síntese dos resultados obtidos durante o ensaio está exibida na Tabela 10.

Tabela 10 - Síntese dos resultados de adsorção em coluna de filtração

Volume (mL)	Absorbância (-)	Concentração (mg/L) - C_0	C/C_0	Eficiência (%)
550	0,218	12,89	0,077	92,30
3450	0,037	-0,07	0	100
5750	0,035	-0,18	0	100
9500	0,018	-2,79	0	100
18450	0,033	-0,64	0	100
28850	0,023	-2,07	0	100
37250	0,037	-0,07	0	100

Fonte: Autora (2020).

Os resultados obtidos mostram que o bagaço de cana aqui estudado tem grande capacidade adsorptiva, possibilitando uma remoção de 100 % de óleos e graxas durante quase todo o monitoramento do sistema, exceto nos volumes iniciais ensaiados.

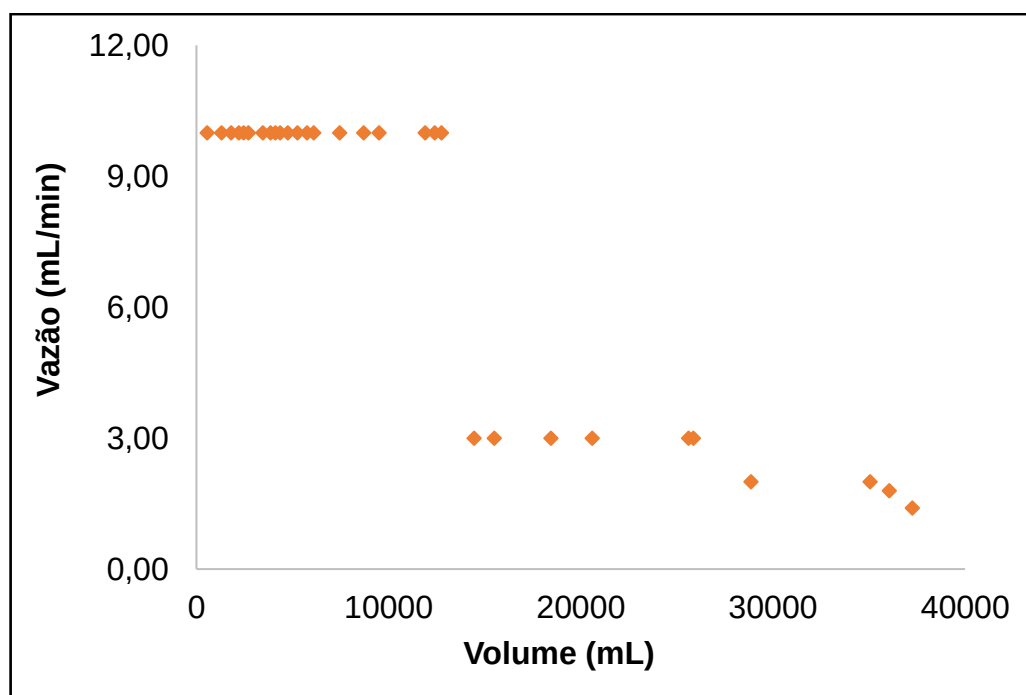
Acredita-se que a absorbância detectada no início do ensaio, até os 2,2 L iniciais filtrados é originada de resquícios de sacarose presente no bagaço. O sistema

tratou um volume de aproximadamente 38 litros de efluente por aproximadamente 95 horas, não sendo detectada a presença de óleos e graxas no final do experimento.

Notou-se durante o ensaio que após a filtração de 14,5 L, a vazão de 10 mL/min que estava sendo monitorada e controlada diminuiu para aproximadamente 3 mL/min e 2 mL/min, mantendo-se assim até o final do ensaio, sem a possibilidade de aumento da vazão, visto que a válvula controladora estava completamente aberta. Esse fato está demonstrado na Figura 38.

Acredita-se que a diminuição da vazão surgiu devido ao efeito de colmatção do adsorvente, pois o fenômeno afeta diretamente na capacidade de escoamento do meio filtrante, comprometendo a eficiência do sistema e impossibilitando o uso da coluna por mais tempo. Para evitar que ocorra a rápida colmatção do leito filtrante, alguns autores preferem utilizar na camada superficial da coluna de filtração o adsorvente com maiores granulometrias, como foi o caso de Magalhães *et al.* (2013), que optou por usar para essa camada, granulometrias na faixa de 5,0 a 8,0 mm dos adsorventes estudados (serragem de madeira, bagaço da cana-de-açúcar e pergaminhos de grão de café), enquanto a faixa granulométrica do leito de filtração após a faixa superficial encontrava-se entre 2,0 e 3,0 mm.

Figura 38 - Curva de colmatção



Fonte: Autora (2020).

Devido aos ótimos resultados obtidos no ensaio, a curva de ruptura não apresentou o padrão de “S” tido como padrão nesse tipo de curva, como pode ser percebido na Figura 37. Sendo assim, não foi possível definir os pontos de saturação e de ruptura do leito adsorvente.

A capacidade adsortiva da coluna de filtração utilizando o bagaço da cana-de-açúcar foi calculada através da Equação 5, substituindo o volume de saturação, que não foi possível obter, pelo volume total ensaiado neste trabalho, resultando em uma capacidade adsortiva de 3447,17 mg de óleos e graxas/g do bagaço da cana. Entretanto, sabe-se que a capacidade adsortiva real do adsorvente é superior ao valor aqui calculado.

O bagaço da cana-de-açúcar utilizado neste trabalho com o intuito de remover óleos e graxas presentes em um efluente, mostrou-se como um adsorvente com capacidade adsortiva superior a outros trabalhos com a mesma finalidade, seja trabalhos que utilizaram biomassa *in natura*, como casca de coco, plantas aquáticas e o próprio bagaço da cana, ou até mesmo trabalhos que utilizaram o carvão ativado.

Rodriguez (2017), determinou a potencialidade de bioadsorção do bagaço da cana-de-açúcar na remoção de óleos e graxas de efluente sintético com concentração de 250 mg/L. Os experimentos foram realizados em batelada e em coluna de filtração, utilizando as granulometrias de 1,19 mm e 1,40 mm. Para o ensaio em coluna de filtração a vazão foi mantida em 4 mL/min, e a melhor capacidade adsortiva foi de 100 mg de óleo/g do bagaço, obtida pela granulometria de 1,4 mm.

Araújo *et al.* (2017), estudaram a remoção de óleo da água produzida nas atividades de produção e exploração de óleo e gás, utilizando carvão ativado comercial. Os experimentos foram realizados em coluna de filtração utilizando a água produzida sinteticamente com concentração de 400mg/L de querosene comercial e com vazão volumétrica de operação de 145,2 mL/min. A capacidade de adsorção do carvão ativado obtida por esses autores foi de 442,34 mg de óleo/g de carvão.

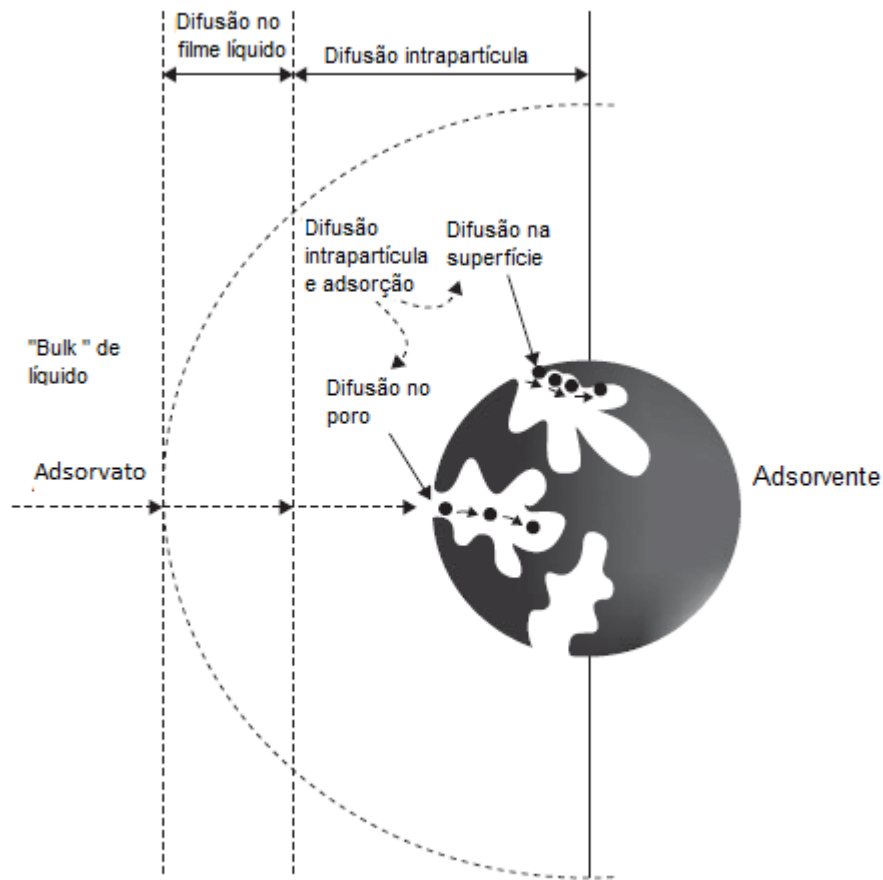
Khan *et al.* (2004) estudaram a remoção de óleos e graxas nos efluentes de postos de gasolina, constituído por mistura de óleos de motores, lubrificantes, perdas de gasolina, aditivos fluidos hidráulicos, utilizando diferentes biomassas. Para o estudo utilizou-se um efluente sintético com concentração de 50 mg/L de óleo de

motor em água e com uma taxa de fluxo de água de 20 L/min e de óleo de 1 mL/min. As capacidades de adsorção obtidas por esses autores foram: 58 mg de óleo/g de casca de coco, 19 mg de óleo/g de bagaço de cana, 1107 mg de óleo/g de *Typha latifolia* (planta herbácea perene do gênero *Typha*, encontrada como uma espécie de planta nativa na América do Norte e do Sul, Europa, Eurásia e África) e 944 mg de óleo/g de *Salvinia* sp (planta aquática nativa do sudeste do Brasil).

Os valores de capacidade de adsorção muito menores, se comparadas a este trabalho, obtidas por diferentes autores e diferentes biomassas podem ser atribuídos à alguns fatos: às maiores concentrações de óleos e graxas presentes nos efluentes utilizados por Rodriguez e Araújo *et al.*, o que ocasiona em menores volumes de saturação, pois quanto maior quantidade de poluente houver no líquido a ser filtrado, mais rapidamente a superfície das partículas do adsorvente serão cobertas e se tornarão inutilizáveis; às maiores vazões de operação utilizadas nos trabalhos de Araújo *et al.* e Khan *et al.*, que proporcionam menor tempo de contato entre as moléculas de óleo e as partículas dos adsorventes, e conseqüentemente acarretam em deficiência no arranjo de tais moléculas na superfície do adsorvente, afetando no aproveitamento total da capacidade de adsorção do adsorvente; às diferentes porosidades, densidades, áreas superficiais e granulometrias dos adsorventes; e ainda, ao o tamanho das moléculas, acidez, polaridade e solubilidade do adsorvato.

Acredita-se ainda, que a grande remoção de óleos e graxas presentes no efluente tenha se dado devido ao fenômeno de difusão na superfície porosa do adsorvente (difusão intrapartícula), o que propicia a adsorção dentro do poro, acarretando em mais espaços para ocorrer a adsorção do poluente. De acordo com Patrícia (2016), o processo de adsorção ocasionado pela superfície externa do adsorvente é muito lento (difusão interpartícula), enquanto o processo dentro dos poros é instantâneo, o que proporciona agilidade e maior área de contato para remoção do adsorvato. A Figura 39 apresenta os dois processos de difusão na partícula do adsorvente, que podem ter sido fatores determinantes para os resultados obtidos no estudo.

Figura 39 - Principais mecanismos de transporte de um adsorvato em massa líquida para um adsorvente



Fonte: Adaptado de ÇEÇEN e AKTAS (2011).

Diante do exposto, a grande capacidade que o bagaço da cana utilizado neste trabalho apresentou em remover óleos e graxas presentes em um efluente, através de sua aplicação como adsorvente em uma coluna de filtração é uma condição bastante benéfica para o meio ambiente, pois além da técnica de tratamento apresentar-se como um sistema de baixo custo de implantação e operação, já que o adsorvente utilizado é um subproduto da agroindústria e muitas vezes não possui destinação final ambientalmente adequada e muito menos é explorado para a sua reutilização, é ainda um processo que possibilita o tratamento de efluentes com poluentes muito presentes em diversas indústrias e residências, o que impede a degradação ambiental.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho que visou avaliar o potencial do bagaço da cana-de-açúcar utilizado como adsorvente para redução e remoção de óleos e graxas presentes em um efluente sintético através da utilização de coluna de filtração, obteve ótimos resultados, apresentando a capacidade de remover totalmente as moléculas de óleos e graxas presentes no efluente sintético produzido, durante todo o tempo de funcionamento do ensaio de adsorção.

Dessa forma, durante a concretização dos objetivos específicos propostos nesta pesquisa foram obtidas as seguintes conclusões:

A granulometria do bagaço da cana-de-açúcar escolhida para os ensaios (0,60 mm) caracterizou-se por apresentar pequenas fibras alongadas, densidade média de 0,0570 g/mL, baixo teor de umidade, visto que o bagaço já havia sido previamente preparado, encontrando-se praticamente seco, alto teor de materiais voláteis, mas dentro da faixa de comparação com outros trabalhos, o que demonstra que o adsorvente possui facilidade de queima. E o bagaço ainda apresentou baixo teor de cinzas e de carbono fixo. Quanto a perda de massa em função do tempo, notou-se que o melhor momento para encerrar o processo de secagem em estufa, que contribui diretamente para o processo de adsorção, é após 5h de secagem.

O bagaço também foi utilizado como adsorvente do corante azul de metileno, apresentando-se menos eficaz do que para a remoção de óleos e graxas, mas ainda demonstrando um bom desempenho até aproximadamente as 5 horas de ensaio iniciais, enquanto que para o ensaio de adsorção de óleos e graxas o adsorvente removeu totalmente o poluente por aproximadamente 95 horas de funcionamento, utilizando menor quantidade de bagaço. Essa grande diferença de eficiência de remoção ao longo do tempo se dá provavelmente pelo tipo de adsorvato, visto que as características do elemento a ser removido afetam no desempenho do adsorvente. Dessa forma sugere-se para trabalhos futuros, que para os dois ensaios sejam analisados o tamanho das moléculas, a acidez ou basicidade, a polaridade e a solubilidade dos adsorvatos.

O ensaio de adsorção em coluna de filtração, demonstrou que o bagaço da cana-de-açúcar apresenta-se como uma alternativa eficiente para o tratamento de efluentes contendo óleos e graxas provenientes de diversas atividades, mas principalmente efluentes oriundos da lavagem de automóveis e de oficinas mecânicas,

visto que o óleo para produção do efluente sintético em estudo é utilizado para a lubrificação de motores, o que provavelmente contribuiu para os resultados alcançados, já que a capacidade de adsorção depende também das características do adsorvato.

A caracterização do efluente sintético em alguns volumes tratados demonstrou que os diferentes resultados de pH, sólidos totais, turbidez, alcalinidade e temperatura não afetaram na qualidade de remoção de óleos e graxas. Entretanto é notório que cada característica de volume de efluente ensaiado não apresentou grande diferença em seus resultados, o que pode ter contribuído para conservar a capacidade adsortiva do bagaço.

O adsorvente apresentou 100% de eficiência na remoção de óleos e graxas do efluente sintético durante o funcionamento do sistema de filtração em coluna, e capacidade de adsorver 3447,17 mg do adsorvato/g do adsorvente. Entretanto, acredita-se que o bagaço poderia apresentar maior capacidade adsortiva, visto que a capacidade de adsorção foi estimada com o volume em que a coluna de filtração teve a sua eficiência de escoamento comprometida, devido ao efeito de colmatação. Diante disso, sugere-se para os próximos trabalhos a adoção de medidas que minimizem ou anulem o efeito de colmatação, como por exemplo a utilização de duas granulometrias de bagaço na coluna, a de 0,60 mm, pois demonstrou-se muito eficiente para o objetivo do trabalho, e ainda a aplicação de bagaço com maior granulometria na camada superior da coluna de filtração, logo após a areia.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Atlas da energia elétrica do Brasil. In: ANEEL. **Fontes renováveis: Biomassa**. 3. ed. Brasília, 2008. p. 63-73.
- AHMARUZZAMAN, M; SHARMA, D.K. Adsorption of phenols from wastewater. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.287, p. 17-24, 1 jul. 2005.
- ALARCON, G. A. R. *et al.* Caracterización del bagazo de la caña de azúcar. In: 6º congresso internacional sobre geração distribuída e energia no meio rural, 2006, Unicamp. Campinas: Agrener, 2006.
- ALMEIDA F.B.P.S. *et al.* Oil produced water treatment using sugarcane solid residue as biosorbent. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, México, v. 18, n. 1, p. 27-38, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1991. Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. **Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke**. ASTM, D 3173-87, Philadelphia, PA, p.324-325.
- ARAUJO D. A. *et al.* Remoção do óleo da água produzida utilizando o carvão ativado comercial. **HOLOS**, Rio Grande do Norte, v.8, p. 12-31, 2017. DOI: 10.15628/holos.2017.5891. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5891>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14063**: Óleos e Graxas - Processos de Tratamento em Efluentes de Mineração. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; MARCILIO, Carolina; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. **Revista Minerva**, São Carlos, v. 5, n. 3, p. 297-305, 2008.
- BLOG INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. **Os maiores desafios de medição de nível para usinas de açúcar e álcool**. Disponível em: <https://instrumentacaoecontrole.com.br/os-maiores-desafios-de-medicao-de-nivel-para-usinas-de-acucar-e-alcool/>. Acesso em: 22 de janeiro de 2020.
- BONI, Hevelin Tabata. **Aplicação de biomassa na redução do teor de óleos e graxas presentes em efluentes aquosos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

BORBA, C. E. *et al.* Estudo da cinética e do equilíbrio de adsorção dos corantes azul turquesa QG e amarelo reativo 3r em carvão ativado. **ENGEVISTA**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 135-142, 2012.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 393, de 08 de agosto de 2007**. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. Brasília, DF, 2007.

BRASIL. **Decreto Federal nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 08 de janeiro de 2020.

BRASIL, Alex Nogueira. *et al.* Novas tecnologias para a produção mais eficiente de biodiesel. *In*: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTECC. Foz do Iguaçu, 2016.

CARVALHO, Emanuel da Silva. **Reuso do mesocarpo de coco na remoção de contaminantes derivados de petróleo presentes em corpos d'água, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Química Industrial) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

CASAGRANDE, A. A. 1991. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 157p.

CECCHI, H. M. Fundamentos teóricos e práticos em análise dos alimentos. *In*: CECCHI, H. M. **Cinza e conteúdo mineral**. 2.ed. Campinas: UNICAMP, 2003. p 49-59.

ÇEÇEN, F. AKTAS, O. **Activated carbon for water and wastewater treatment: Integration of adsorption and biological treatment**. Wiley-VCH. Verlag & Co, 2012.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol combustível: Uma oportunidade para o Brasil**. Brasília, p.536, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**. Brasília, v. 6, n.3, 58 p, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**. Brasília, v. 5, n.1, 66 p, 2018.

COSTA, F. O. *et al.* Uso da casca da banana como bioadsorvente em leito diferencial na adsorção de compostos orgânicos. *In*: Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB. Campina Grande, 2012.

CURBELO, Fabíola Dias da Silva. **Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

CRUZ S. H. Bagaço e palha da cana são fontes de celulose para gerar álcool. **Revista Visão Agrícola**, São Paulo, n. 8, p 13-14, 2008.

DABROWSKI, A. **Adsorption - from theory to practice**. Poland: Faculty of Chemistry, M.Curie-Skłodowska University, 2003. 90 p.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípio das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 682 p.

GARCÍA-PÉREZ M. *et al.* Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. **Journal of Analytical and Applied Pyrolyses**, Canadá, n. 65, p. 111 – 133, 2002.

GASPAR, A. T. F. S. **Bioadsorção de cromo em algas marinhas utilizando coluna extratora**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

GUIMARÃES V. C. **Adsorção-Dessorção de Partículas Neutras em Sistemas com Superfícies Não-Idênticas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

KATYAL, S; THAMBIMUTHU, K; VALIX, M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics. **Renewable Energy**. Canadá: Pergamon, v. 28, p. 713-725, 2003.

KHAN, E. *et al.* Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. **Chemosphere**. V.57, p. 681-689, 2004.

KLEINÜBING, S. J. **Remoção de cádmio, chumbo e cobre utilizando zeólita natura clinoptilolita em coluna de leito fixo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

MAGALHÃES, M. A. *et al.* Uso de filtros orgânicos na remoção de óleos e graxas presentes na água residuária de suinocultura. **Engenharia na Agricultura**. Minas Gerais, v.21, n.4, p. 387 – 395, 2013.

MORAIS, N. W. S; SANTOS, A. B. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reuso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAE**, São Paulo, v. 67, n. 215, p. 40-55, 2019. DOI: 10.4322/dae.2019.004.

MELHENBACHER, V. C. **The analysis of fats and oils**. Lasa: Edição URMO, 1977. v. 6, 629 p.

METCALF & EDDY. Inc. Wastewater Engineering. **Treatment, Disposal and Reuse**. McGraw-Hill. 1991. 1334p.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

NOGUEIRA, M. F. M; RENDEIRO, G. Combustão e gasificação de biomassa sólida. *In*: NOGUEIRA, M. F. M; RENDEIRO, G. **Caracterização energética da biomassa vegetal**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p 53-63.

OLIVEIRA, Oliveira de Jesus de. *et al.* Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como adsorvente na redução da acidez de óleo residual para produção de biodiesel. **Revista Tecnológica**, Maringá, p. 83-91, 2014.

OLIVEIRA, Jairo Pinto de. *et al.* Caracterização físico-química de resíduos oleosos do saneamento e dos óleos e graxas extraídos visando a conversão em biocombustíveis. **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 597-602, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140094>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422014000400004. Acesso em: 15 jan. 2020.

PAZ, J. E. M. *et al.* Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana-de-açúcar ativado. **HOLOS**, Rio Grande do Norte, ano. 32, v.8, p. 03-18, 2018.

PATRÍCIA, C. A. P. C. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo: filtração, adsorção e foto – fenton**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA nº 355, de 13 de julho de 2017**. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Diário Oficial do Estado, 2017.

RODRIGUES, C. R. **Degradação térmica da casca de arroz e utilização do carvão obtido no processo para polimento de águas cinzas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

RODRIGUEZ, J. O. **Determinação da potencialidade de bioadsorção do bagaço de cana-de-açúcar na remoção de óleos e graxas de efluente sintético**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Process**. New York: John Wiley & Sons, 1984. 427 p.

SANCHEZ, M. E. *et al.* Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, 33, p 933-940, 2009.

SANTOS, E.G. *et al.* Desempenho de Biomassas na Adsorção de Hidrocarbonetos Leves em Efluentes Aquosos. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 2, p.327-331, 2007.

SHEUFELE, F. B. *et al.* Aplicação do bagaço de cana-de-açúcar como material adsorvente na remoção do corante reativo azul 5G. *In*: Congresso brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis, 2014.

SILVA, F. C. *et al.* Avaliação do bagaço da cana-de-açúcar como adsorvente natural na remoção de corantes têxteis. *In: Congresso brasileiro de Química*. São Luís, 2011.

SILVA, Jean Constantino Gomes da. **Estudo dos parâmetros cinéticos da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SILVA, João Paulo Nunes da; SILVA, Maria Regina Nunes da. **Noções da cultura da cana-de-açúcar**. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 106 p.

TREYBAL, E. R. **Mass-transfer operations**. New York: McGraw- Hill, 1955. 242 p.

VIEIRA, Ana Carla. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. Dissertação (Pós-graduação em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. *In: VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. v. 1, 3º edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005.

WAELEKENS, B. E. **Tratamento de efluentes industriais mediante a aplicação de argila organofílica e carvão ativado granular**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2010.tde-18082010-165358>. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-18082010-165358/pt-br.php>. Acesso em: 10 dez. 2020.